



TRABAJO DE FIN DE CARRERA

TÍTULO: Estudio de parámetros de conectividad y topología en redes ad-hoc con distintos patrones de movilidad.

AUTOR: Eduardo Valls Hermida

DIRECTOR: Carles Gómez Montenegro

FECHA: 05 de Octubre de 2006

Resumen

En este trabajo se ha desarrollado una herramienta software para el estudio de parámetros de conectividad y topología de redes ad-hoc. Este planteamiento ha sido motivado por la ausencia de modelos analíticos o de otras herramientas software que permitan obtener los parámetros considerados. Tales parámetros son: probabilidad de nodo aislado, probabilidad de conectividad extremo a extremo, número de saltos para una ruta, tiempo medio de camino sin cortes y duración media de un corte.

La herramienta desarrollada ha permitido analizar cómo influyen en los parámetros indicados el siguiente conjunto de variables: el modelo de movilidad de los nodos de la red, el radio de transmisión de los mismos, la velocidad y la densidad de nodos por superficie.

Los resultados obtenidos en el estudio pueden ser de gran ayuda para la obtención de distintos parámetros de rendimiento de una red ad-hoc.

In this paper it has been developed a software tool for the study of parameters in connectivity and topology of ad-hoc networks. This fact has been promoted by the inexistence of analitic models or other software tools wich allow getting considered parameters. Such parameters are: isolated node probability, peer to peer connectivity probability, number of hops for one path, media time of path without losing connection and media duration of them.

The developed tool allowed analisys of following variable group influence: network nodes mobility model, their transmission radius, velocity and nodes density in the surface.

The obtained results in this paper can be very helpfull in order to obtain many reliability parameters in a ad-hoc network.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a toda la gente que con su apoyo y cariño me ha ayudado a alcanzar la gran meta que para mi es finalizar mi diplomatura en telecos.

En segundo lugar pero no por ello menos importante, tengo que destacar la labor de una persona que ha jugado un papel fundamental en la realización de este trabajo final de carrera, por su constante atención e incondicional colaboración en todo momento, me refiero al señor Carlos Gómez Montenegro, al que le deseo la mejor de las suertes en todos sus proyectos, ante todo en su tesis doctoral que pronto finalizará sin duda con gran éxito, animo y gracias Carles !!

No podría finalizar sin agradecer también a mi familia y amigos los sabios consejos que me han dado y que seguro me seguirán dando: gracias a mi madre y a mi padre por ayudarme en todo lo que han podido , gracias Carlos, Alex y David por ser además de mis hermanos mis mejores amigos, gracias Ito por estar siempre ahí en los buenos y malos momentos como uno más de mi familia, gracias Mario por tu ayuda y comprensión, me has demostrado que además de buen compañero eres un buen amigo, igual que David da Zeus, al que debo mucho por aguantarme sobre todo en mis bochornosos momentos de bajón. También a ti Ceci te agradezco tu interés y colaboración en todo momento, y por último mil gracias a mi abuela que fue, es y será siempre la mayor de mis inspiraciones.

Finalmente agradezco también a todos los miembros del tribunal el tiempo dedicado a la lectura de este trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
MOTIVACIÓN.....	6
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES AD-HOC	8
1.1. DEFINICIÓN Y ORIGEN	8
1.1. CARACTERÍSTICAS SEGÚN LA HETEROGENEIDAD DE LOS DISPOSITIVOS	9
1.2. CONSUMO DE ENERGÍA	10
1.3. ROUTING.....	10
1.4. SEGURIDAD.....	11
1.5. INTEGRACIÓN EN INTERNET	12
1.6. APLICACIONES	12
CAPÍTULO 2. CONECTIVIDAD Y TOPOLOGÍA EN REDES AD-HOC.....	14
2.1. PARÁMETROS DE CONECTIVIDAD Y TOPOLOGÍA.....	14
2.1.1. PROBABILIDAD DE NODO AISLADO	14
2.1.2. PROBABILIDAD DE CONECTIVIDAD EXTREMO A EXTREMO	14
2.1.3. NÚMERO MEDIO DE SALTOS EXTREMO A EXTREMO	14
2.1.4. DURACIÓN DE UN CAMINO SIN CORTES.....	15
2.2. ALGUNOS ESTUDIOS SOBRE TOPOLOGÍA Y CONECTIVIDAD EN REDES AD-HOC	16
2.2.1. BETTSTETTER I [2]	16
2.2.2. BETTSTETTER II [3]	17
2.2.3. GÓMEZ ET AL [4]	19
2.3. MODELOS DE MOVILIDAD	19
2.3.1. MANHATTAN GRID (MG)	19
2.3.2. RANDOM WAYPOINT (RW).....	21
2.3.3. RPGM	22

CAPÍTULO 3. APLICACIONES UTILIZADAS Y DESARROLLADAS.	24
3.1. ANALISIS DE LA FUENTE DE DATOS, BONNMOTION	24
3.2. ENTORNO DE DESARROLLO Y APLICACIONES: AHP + AHG	25
3.2.1. ESQUEMA GENERAL.....	26
3.2.2. COMPONENTES	27
3.2.3. CÁLCULO DE PARÁMETROS DE CONECTIVIDAD Y TOPOLOGÍA	31
3.2.3.1. PROBABILIDAD DE NODO AISLADO	31
3.2.3.2. PROBABILIDAD DE CONECTIVIDAD EXTREMO A EXTREMO.....	32
3.2.3.3. NÚMERO DE SALTOS EXTREMO A EXTREMO	32
3.2.3.4. TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES.....	33
3.2.4. INTERFAZ DE USUARIO, PARÁMETROS Y RESULTADOS.....	34
3.2.4.1. AHP.....	34
CAPÍTULO 4. SIMULACIONES Y RESULTADOS	39
4.1. PARÁMETROS DE LAS SIMULACIONES	40
4.2. PROBABILIDAD DE NODO AISLADO	40
4.2. PROBABILIDAD DE CONECTIVIDAD EXTREMO A EXTREMO.....	44
4.3. NÚMERO DE SALTOS EXTREMO A EXTREMO	51
4.4. DURACIÓN MEDIA DE UN CAMINO SIN CORTES	57
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	62
5.1. CONCLUSIONES	62
5.2. LINEAS FUTURAS	63
REFERENCIAS	67
ANEXOS	65
DURACIÓN MEDIA DE CORTES EN UN CAMINO	65
RESULTADOS NUMÉRICOS DE LAS SIMULACIONES ESTUDIADAS EN ESTE TRABAJO.	70

INTRODUCCIÓN

Motivación

Hoy por hoy resultan habituales las tecnologías inalámbricas, que se introducen cada vez más en nuestra vida cotidiana. Algunos ejemplos son el estándar GSM de telefonía móvil, la tecnología Wireless LAN 802.11 para redes de área local, los dispositivos infrarrojos para comunicaciones de corto alcance, o la tecnología Bluetooth. El auge de los dispositivos portables y las tecnologías móviles han suscitado el interés de la comunidad científica por las redes móviles ad-hoc.

Para conocer las prestaciones de una red ad-hoc, es necesario conocer asimismo ciertos parámetros relevantes a nivel de conectividad y topología de la red. Sin embargo, no existen herramientas analíticas o software que permitan obtener algunos de estos parámetros.

Objetivos

Este trabajo tiene dos objetivos principales:

- El desarrollo de herramientas software versátiles que sean capaces de proporcionar información sobre conectividad y topología de una red ad-hoc en formato numérico y gráfico, para variables como: el modelo de movilidad, radio de transmisión de los nodos, velocidad de los mismos y densidad de nodos por superficie. Los parámetros de conectividad y topología considerados son: probabilidad de nodo aislado, probabilidad de conectividad extremo a extremo, número de saltos de una ruta, tiempo medio de camino sin cortes y duración de un corte en un camino.
- Un estudio comparativo acerca de la influencia de las variables indicadas en los parámetros de conectividad y topología de interés en este proyecto.

Estructura

El trabajo está estructurado en cinco capítulos: El capítulo inicial pretende introducir al lector en los fundamentos de la tecnología Ad-hoc, así como su definición, funcionamiento, características y aplicaciones. El segundo capítulo define los parámetros de conectividad y topología de interés en el proyecto, resume la literatura más relevante para este trabajo y se definen los patrones de movilidad utilizados. En el tercer apartado podemos ver la estructura y funcionamiento de las aplicaciones desarrolladas y utilizadas para este trabajo. El cuarto capítulo expone los resultados mediante gráficas

y sus correspondientes justificaciones. El último capítulo contiene las conclusiones principales del trabajo, así como también el subapartado de líneas futuras.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES AD-HOC

1.1. Definición y origen

¿Qué es MANET, cómo surge y que características tiene?

Un MANET o red ad-hoc está formada por un conjunto de nodos inalámbricos que se auto-organizan para intercambiar información sin la ayuda de ninguna infraestructura preexistente. Estos nodos, en general, tienen recursos limitados en cuanto a capacidad de procesamiento, almacenamiento y energía. Los enlaces inalámbricos entre los nodos de una red móvil ad-hoc tienen un ancho de banda limitado y suelen ser muy inestables y propensos a errores de transmisión.

En este entorno, los nodos pueden agregarse a la red de forma espontánea y desaparecer igualmente. Los nodos pueden ser origen o destino de una comunicación o pueden actuar como.

Los nodos también pueden hacer de pasarela para generar redes híbridas como podría ser el caso de acceder a Internet a través de un nodo vecino. En este trabajo analizaremos posibles escenarios que podrían generarse con este tipo de redes y obtendremos resultados respecto a conectividad y topología.

En general, cualquier propuesta real aplicable a una MANET deberá tener en cuenta las restricciones impuestas por las características inherentes a este tipo de redes. Hasta ahora, los esfuerzos de investigación, guiados por el grupo de trabajo MANET [2] dentro del IETF, se han centrado, principalmente, en temas relacionados con el encaminamiento. Sin embargo, existen otros aspectos no menos importantes que deben ser abordados en el diseño de una red de elevada funcionalidad y disponibilidad.

¿A que entorno podría adaptarse este tipo de redes?, pues este tipo de redes tienen un importante interés en el ámbito militar debido a su gran dinamismo y adaptación al movimiento de los nodos que la componen.

Sin embargo, dado que las redes ad-hoc se establecen de forma rápida y son muy flexibles, son atractivas para muchas aplicaciones emergentes,

como la comunicación entre dos o más nodos en cualquier momento y lugar (museo, ciudad, aulas, conferencias,...), las transmisiones de audio y vídeo en áreas de desastre, e incluso el acceso inalámbrico a Internet desde cualquier sitio.

1.1. Características según la heterogeneidad de los dispositivos

Hoy por hoy existen dispositivos móviles muy diferentes capaces de soportar infraestructuras de comunicaciones comunes. En definitiva conocemos todos conocemos la existencia de ordenadores portátiles, PDA's o agendas electrónicas, teléfonos móviles que son casi minicomputadoras, videoconsolas portátiles, etc. Evidentemente existen grandes diferencias de implementación física entre todos estos dispositivos que pueden afectar al rendimiento de la comunicación y al diseño de protocolos de comunicación.



Figura 1.1 Posibles dispositivos móviles

La figura 1.1 muestra diferentes tipos de dispositivos móviles, todos ellos con diferentes características, capacidad de procesamiento, memoria, disco y duración de baterías. Todas estas características definen la potencia del dispositivo y en función de eso se caracteriza un dispositivo ad-hoc en cuanto al papel que juega dentro de una red. Estas características implican que dentro de una misma red ad-hoc pueda haber dispositivos más potentes que otros, y que algunos puedan trabajar como cliente/servidor así como otros puedan hacerlo únicamente como clientes. Debido a que no existe ninguna infraestructura previa, los nodos tendrán que realizar funciones de enrutamiento y este es un aspecto muy delicado de cara al consumo de batería ya que un dispositivo podría agotar su batería en beneficio de otros, por tanto se hace necesaria la capacidad de auto examinarse antes de aceptar una posible petición de reenvío de paquetes por parte de otra fuente de datos.

1.2. Consumo de energía

Los dispositivos más usuales que tenemos hoy utilizan protocolos de comunicación que no tienen en cuenta el consumo de baterías debido a que se trata de nodos estáticos y enrutadores que se alimentan directamente desde la red eléctrica convencional. Aún así la presencia de baterías es necesaria a la hora de diseñar dispositivos móviles, y la tecnología de las baterías no avanza tan rápidamente como la potencia de los ordenadores. Una batería es un dispositivo electroquímico el cual almacena energía en forma química. Cuando se conecta a un circuito eléctrico, la energía química se transforma en energía eléctrica.

Las baterías más habituales se componen principalmente de Hidróxido de Níquel y Cadmio, un metal pesado que además de incrementar el peso del dispositivo presenta un peligro ecológico importante. Este tipo de baterías son las que convencionalmente conocemos como “pilas” y proporcionan normalmente 1,2 voltios. Parece ser que el mejor resultado obtenido dentro del sector ha sido la utilización de Litio. Este material tiene numerosas ventajas respecto a las baterías convencionales de Níquel. Su gran ventaja es que duran más horas y se pueden recargar en cualquier momento sin necesidad de esperar a que esté totalmente descargada, ya que no tienen el "efecto memoria" que tienen las otras.

Las investigaciones más recientes trabajan con el objetivo de crear una batería pequeña y barata, con una autonomía muy superior a la de las baterías de Litio, y que en el futuro pueda por ejemplo alimentar un móvil durante un mes. Uno de los últimos descubrimientos ha surgido de los investigadores de Motorola Labs. Han construido y presentado en la Power 2000 Conference en San Diego un prototipo de una micro batería apta para producir energía a partir del metanol, también designado de alcohol. El funcionamiento consiste en la mezcla de oxígeno y metanol dentro de un envoltorio cerámico, que genera energía a la temperatura ambiente.

1.3. Routing

Dado que una red ad-hoc es inherentemente dinámica, el encaminamiento en este tipo de redes ha focalizado la atención de muchos investigadores. En ad-hoc, no existe una única estrategia de encaminamiento posible o válido, sino que podemos encontrar que cada uno de los distintos enfoques realizados hasta el momento puede resultar especialmente adecuado para un tipo de escenario en concreto. Debemos tener en cuenta que los patrones de movilidad de los nodos, las características de los dispositivos a

considerar y el tipo de tráfico que éstos deben intercambiar determinarán unas condiciones específicas que pueden diferir significativamente según los casos. De este modo, la paleta de protocolos de encaminamiento es amplia y rica en características.

Los protocolos de encaminamiento en redes ad-hoc pueden dividirse en las siguientes categorías: unicast, multicast y broadcast. En este artículo nos centraremos en los primeros, es decir, los que resuelven cómo llegar desde un origen hasta un único destino.

Una primera clasificación de los protocolos de encaminamiento unicast consiste en identificar dos grandes grupos de protocolos: los proactivos y los reactivos. Por otro lado, existe un conjunto de protocolos híbridos, que combinan características de ambos.

Existen dos protocolos proactivos (OLSR y TBRPF) que han sido estandarizados como RFC. Por su parte, un protocolo reactivo (AODV) también dispone de RFC, mientras que todo apunta a que un segundo protocolo reactivo (DSR) complete dentro de poco el cuarteto de protocolos estandarizados. De este modo, dos mecanismos de cada tipo gozarán de un estatus que les situará como protocolos preferentes para su uso en Internet. Actualmente, el grupo MANET [1] del IETF está desarrollando las especificaciones de DYMO (protocolo reactivo) y OLSRv2 (protocolo proactivo), que se pondrán para su publicación como RFC Standards Track.

1.4. Seguridad

Los requisitos de seguridad en una red móvil ad-hoc son los mismos que los existentes en redes tradicionales, y se enumeran a continuación: confidencialidad, integridad, autenticación, no repudiación y disponibilidad. Sin embargo, las características generales de una MANET de topología dinámica, enlaces de ancho de banda limitado y capacidad variable, limitaciones de energía y capacidad de procesamiento en los nodos y seguridad física limitada, hacen del cumplimiento de los requisitos anteriores un problema mucho más complejo de abordar, mostrando la dificultad de diseñar una solución general en términos de seguridad sobre un escenario móvil ad-hoc. La política de seguridad a aplicar en un entorno ad-hoc dependerá, en gran medida, de la aplicación y del escenario concretos para los que se realiza el despliegue de la red, por tanto las propuestas de seguridad se centran en aspectos concretos del problema. Generalizando se podrían identificar tres aspectos clave que deben ser

cubiertos por cualquier política de seguridad en redes ad-hoc: sistemas de detección de intrusiones (SDI), seguridad de los protocolos de encaminamiento y servicios de gestión de claves.

Las técnicas de prevención, tales como el cifrado y la autenticación, son necesarias como primera línea de defensa en una MANET. Sin embargo, una red wireless ad-hoc presenta vulnerabilidades inherentes que no son fácilmente previsibles. La detección de intrusiones permite establecer una segunda línea de defensa, y puede ser necesaria en beneficio del requisito de disponibilidad.

1.5. Integración en Internet

El protocolo de transporte por excelencia que utilizamos cada vez que navegamos por Internet es TCP (Transmisión Control Protocol). Se trata de un protocolo orientado a conexión que está diseñado para redes cableadas de tal forma que la robustez del protocolo respecto a errores en este tipo de redes es muy alta. El principal problema de las redes cableadas es la posible aparición de congestión, por ello TCP implementa mecanismos reguladores para evitar saturación en la red. En cambio, el principal problema de las redes inalámbricas es la elevada tasa de error que tiene respecto a redes cableadas (del orden de 10^2 veces más errores). Si además le sumamos que en una red ad-hoc los nodos son móviles, se producirán muchos cambios de ruta por rotura de caminos. Estos a su vez provocarán gaps de conectividad y pérdidas, que darán lugar a la expiración del RTO de TCP, por tanto utilizar TCP en estos casos supondría reaccionar con mecanismos que no tocan, y con esto el throughput cae drásticamente. Quizás TCP no es el protocolo de transporte más adecuado para redes ad-hoc pero está disponible y desplegado ampliamente y facilita la integración a internet.

1.6. Aplicaciones

La tendencia a utilizar cada vez más dispositivos inalámbricos nos da un sinnúmero de aplicaciones posibles para estas redes, a continuación se citan algunas de las que se han considerado como más importantes:

- Aplicaciones militares. El origen de estas redes e incluso de lo que hoy conocemos como Internet viene de aplicaciones militares, por lo que hay numerosas aplicaciones en campos de batalla de difícil acceso donde no existe infraestructura previa. Estas redes suponen

un importante avance para este tipo de situaciones ya que se pueden implementar en blindados, aviones y otros elementos móviles.

- Redes para zonas de difícil acceso. Estas aplicaciones se realizan en lugares donde no es posible o no resulta rentable instalar una red cableada debido a la topología del terreno, con lo cual una red de tipo ad-hoc sería una buena alternativa como solución de cara a las comunicaciones.
- Servicio de emergencia. Estas aplicaciones se hacen necesarias en caso de desastre natural (huracanes, inundaciones, terremotos, erupciones, etc.) ya que no es posible asegurar un correcto funcionamiento de red cableada o infraestructura fija previa.
- Redes comunitarias o de empresa. Son redes donde los puntos de acceso pueden comunicarse entre ellos y enlazar nodos correspondientes a diferentes subredes, por ejemplo una comunidad de vecinos.
- Redes de sensores. Este tipo de redes permite infinidad de aplicaciones posibles que en la actualidad provocan un crecimiento muy rápido en su desarrollo. Algunas de estas aplicaciones son la domótica, donde un elemento central puede controlar dispositivos domésticos que implementen sensores, también pueden realizar funciones de monitorización del medio, trabajar a nivel industrial controlando el inventario de una fábrica en tiempo real, o incluso en el campo de la medicina funcionar en forma de nanosensores que puedan detectar niveles de bacterias en una zona o supervisar diferentes funciones del cuerpo humano.

Todas estas aplicaciones son posibles gracias a que los terminales son cada vez más pequeños, con mayor autonomía y coste significativamente bajo. Los fabricantes están realizando esfuerzos de investigación y desarrollo de nuevas aplicaciones a nuevos mercados en auge.

CAPÍTULO 2. CONECTIVIDAD Y TOPOLOGÍA EN REDES AD-HOC

En este capítulo se exponen los parámetros de conectividad y topología que se estudian en este trabajo, justificando en cada caso donde reside la importancia de cada uno de ellos. Los resultados correspondientes a estos parámetros se exponen en el capítulo 4, donde veremos como afectan los diferentes patrones de movilidad, radios de transmisión, velocidad y densidad de los mismos en cada caso.

También se revisan los artículos relacionados con esta temática más relevantes de la literatura y se definen los modelos de movilidad que se considerarán en este trabajo

2.1. Parámetros de conectividad y topología

2.1.1. Probabilidad de nodo aislado

Un nodo aislado no contribuye en la red ya que no es capaz de recibir ni de transmitir información. Es importante evitar esta situación en las redes Ad-hoc, y esto conlleva conocer la probabilidad que un nodo esté aislado y que variables intervienen en el suceso. En cuanto a las variables se ha considerado estudiar como afecta la densidad de nodos, el radio de cobertura de cada uno y la velocidad a la que se mueven.

2.1.2. Probabilidad de conectividad extremo a extremo

Probabilidad que exista un camino entre dos nodos cualesquiera. Este parámetro puede ser útil para conocer el throughput que se puede esperar en una red ad-hoc.

2.1.3. Número medio de saltos extremo a extremo

El número de saltos que adquiera un camino es importante a la hora de valorar costes de throughput y costes energéticos. En el primero de los casos sabemos que el número de saltos afecta proporcionalmente al throughput de un camino de manera que un camino con muchos saltos soporta un volumen de información por unidad de tiempo inferior al que soporta un camino de pocos saltos.

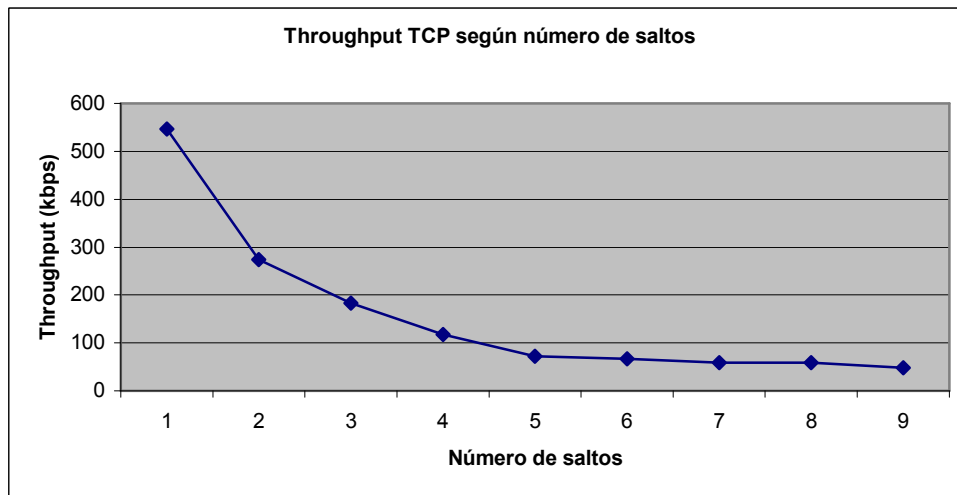


Figura 2.1 Troughput TCP según número de saltos

En cuanto a costes energéticos es evidente que el número de saltos es un aspecto a tener en cuenta ya que en caminos con muchos saltos la suma del gasto energético invertido por cada nodo implicado puede “encarecer” mucho la transmisión.

2.1.4. Duración de un camino sin cortes

La duración media de un enlace es decisiva en lo referente al comportamiento de los protocolos de comunicación que se utilicen. En el siguiente ejemplo se muestra el comportamiento en lo que se refiere al gap del protocolo de transporte TCP en función del gap de conectividad en un camino.

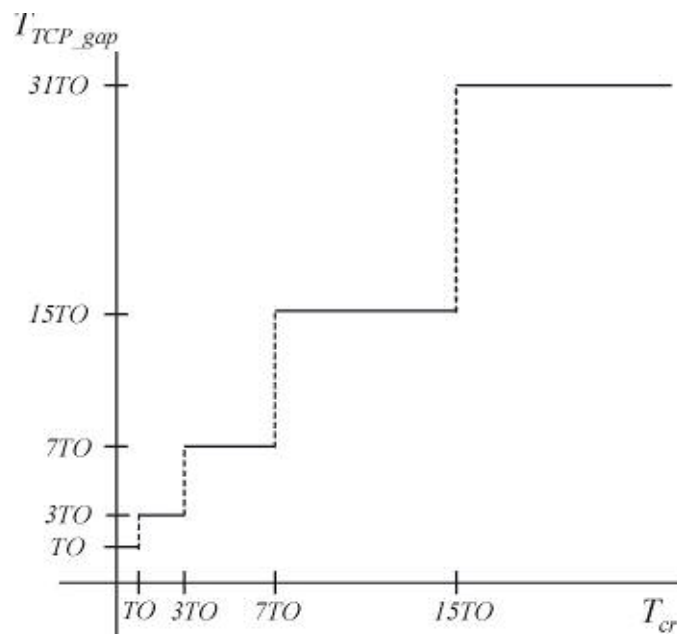


Figura 2.2 GAP TCP en función del corte en un camino

2.2. Algunos estudios sobre topología y conectividad en redes Ad-hoc

A continuación revisaremos la literatura en cuanto a temática de estudio en este TFC.

2.2.1. Bettstetter I [2]

En su primer estudio Bettstetter calcula la probabilidad de nodo aislado y la probabilidad de que una red esté conectada. Propone un análisis basado en nodos uniformemente repartidos donde se genera un grafo que solo se considera conectado cuando todos y cada uno de los pares de nodos tienen un enlace. Bettstetter expone un sistema donde n nodos con un radio de cobertura r_0 se colocan aleatoria y uniformemente en un área $A \gg \pi r_0^2$ con una densidad de nodos $\rho = n / A$ y una distancia mínima de un punto a su punto vecino representada como ξ .

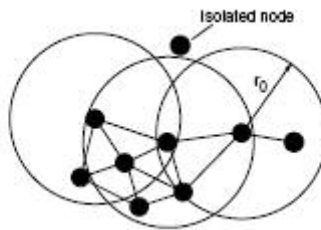


Figura 2.3 Modelo de topología para redes Ad-hoc

Con estos parámetros pretende averiguar cuál es el r_0 mínimo tal que, con una alta probabilidad p , ningún nodo en la red se aísla (es decir, cada nodo tiene por lo menos un vecino).

Para una distribución homogénea de Poisson en dos dimensiones (de ρ constante), la función de densidad de la probabilidad de la distancia vecina más cercana es:

$$f(\xi) = 2\pi\rho\xi \cdot e^{-\rho\pi\xi^2} \quad \text{for } \xi > 0 \quad (1)$$

Cuyo valor medio viene dado por su esperanza:

$$E(\xi) = \int_0^\infty \xi p(\xi) d\xi = \frac{1}{2\sqrt{\rho}} \quad (2)$$

En este uso, un “punto al azar” representa un “nodo al azar” de la red ad-hoc. Así, la probabilidad que la distancia entre un nodo elegido de forma aleatoria y su nodo vecino más cercano sea menor o igual que r_0 es:

$$P(\xi \leq r) = \int_{\xi=0}^r f(\xi) d\xi = 1 - e^{-\rho \pi r^2} \quad (3)$$

De ahí se deduce que la probabilidad que un nodo no tenga ningún vecino (es decir, que esté aislado) sea:

$$P(d(u) = 0) = P(\xi > r_0) = 1 - P(\xi \leq r_0) = e^{-\rho \pi r_0^2} \quad (4)$$

El objetivo es alcanzar un grafo donde ningún nodo de la red quede aislado y la probabilidad que esto ocurra viene dada por la siguiente expresión:

$$P(d_{\min} > 0) = \binom{n}{n} P(d > 0)^n P(d = 0)^0 = \left(1 - e^{-\rho \pi r_0^2}\right)^n \quad (5)$$

Por otro lado Bettstetter también estudia la probabilidad que la red esté conectada, que tal y como se plantea es directamente proporcional a alcanzar un grafo donde ningún nodo de la red quede aislado, o lo que es lo mismo, que el número mínimo de vecinos sea igual o superior al número de nodos del escenario. La probabilidad que una red ad-hoc esté totalmente conectada con n nodos, cada nodo con un r_0 de radio, y una ρ homogénea de densidad:

$$P(G \text{ is } k\text{-connected}) \approx P(d_{\min} \geq k) = \left(1 - \sum_{N=0}^{k-1} \frac{(\rho \pi r_0^2)^N}{N!} \cdot e^{-\rho \pi r_0^2}\right)^n \quad (6)$$

Estos cálculos representan parámetros a nivel global de la red y no dan información concreta como para poder caracterizar analíticamente el comportamiento de protocolos extremo a extremo como TCP o UDP. Esto es debido a que no se dispone de una expresión que determine la probabilidad de conectividad extremo a extremo entre los nodos. Por otra parte, se asume que los nodos están uniformemente distribuidos, lo cual no siempre es válido.

2.2.2. Bettstetter II [3]

En un segundo estudio Bettstetter presenta un escenario basado en uno de los patrones de movilidad que veremos en este proyecto, RW, con lo cual ya no se asume que los nodos estén uniformemente repartidos.

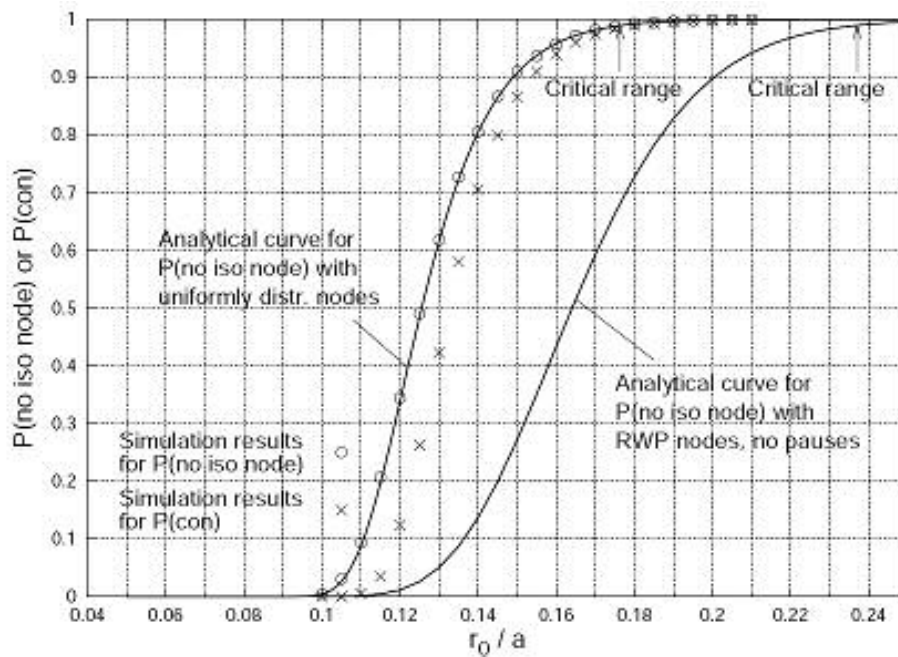


Figura 2.4 Probabilidad de red conectada

Esta gráfica representa la probabilidad de red conectada o lo que es lo mismo la probabilidad de que ningún nodo de la red esté aislado. En este caso los nodos siguen el modelo de movimiento RW, y lo que se puede observar en la gráfica son las curvas obtenidas analíticamente y los puntos obtenidos en la simulación. Los aspectos más destacados en este caso son, en primer lugar, la coincidencia entre los resultados teóricos y simulados en la probabilidad de nodo aislado, y en segundo lugar cabe destacar también como la probabilidad de red conectada sigue un patrón muy parecido al anterior aunque con la diferencia de que para cada radio la probabilidad de red conectada se encuentra siempre por debajo de la probabilidad de que algún nodo esté aislado.

En cualquier caso, los resultados presentados por Bettstetter son interesantes pero se sigue sin disponer de una expresión para la probabilidad de nodo aislado y probabilidad de conectividad extremo a extremo. Por otra parte, tampoco se dispone del tiempo que dura un camino, número de saltos extremo a extremo o tiempo que dura un corte en un camino. El análisis que hemos querido hacer en este trabajo se centra en obtener cálculos a nivel de nodo y no a nivel de red global. El problema de obtener cálculos a nivel de red global es que la falta de resolución en los resultados no permite conocer que niveles de throughput se puede obtener para casos concretos, por ejemplo en caminos con diferente número de saltos, o enlaces con diferentes tiempos medios de corte en sus comunicaciones, etcétera.

2.2.3. Gómez et al [4]

En este artículo se realiza un estudio de los patrones de movilidad MG, RW, RPGM y GM (Gauss Markov) con el objetivo de ver como afectarían a determinados protocolos de routing y transporte. El objetivo del artículo es relacionar lo que ocurre a nivel de topología con el rendimiento de capas superiores. Los parámetros considerados en este documento son todos aquellos proporcionados por Bonnmotion. De esta forma se obtiene información sobre la movilidad relativa (Relative Mobility [5]) del escenario, el número medio de vecinos, el número de particiones o subredes que se generan en el escenario, el tiempo medio de link roto, etc.

2.3. Modelos de movilidad

Seguidamente se definen los modelos de movilidad que vamos a tratar en este trabajo, MG, RW y RPGM.

2.3.1. Manhattan Grid (MG)

El modelo de movilidad MG se caracteriza por restringir el movimiento de los nodos a un escenario con estructura de malla, donde los nodos únicamente pueden moverse por las rectas predefinidas para cada caso. El nombre de este modelo de movimiento es muy intuitivo para identificar este patrón ya que simula ser un escenario como el que puede darse en ciudades como Manhattan o el Eixample de Barcelona. El área de simulación simula ser una red que forma parte de una sección o zona de una ciudad. La velocidad y tipo de calles vienen diferenciadas por el tipo de ciudad que se está simulando. Por ejemplo, las calles podrían formar una cuadrícula que representase el centro de la ciudad con calles pequeñas y estrechas donde la velocidad de circulación fuese reducida, o por el contrario podría representar calles amplias en las afueras de la ciudad donde la velocidad de los nodos mucho más rápidos y fluidos. Gracias al parámetro *ignore* se consigue que los nodos empiecen en un punto aleatorio del escenario ya que el tiempo especificado con este parámetro define el intervalo de tiempo que tienen los nodos para dispersarse sin que este tiempo sea contemplado en la simulación. Posteriormente cada nodo escoge un destino al azar que representa un punto en alguna calle de una ciudad. El algoritmo de movimiento calcula la ruta más rápida (en tiempo) desde el punto de origen hasta el punto de destino. Para ajustar la simulación a la realidad se pueden utilizar algunos parámetros adicionales como el *speedChangeProb*, *minSpeed*, *meanSpeed*, *speedStdDev*, *pauseProb*, *maxPause*, que permiten acotar velocidades y probabilidades de pausa. Cuando un nodo llega a su destino hace una pausa durante un tiempo determinado y entonces escoge un nuevo destino.

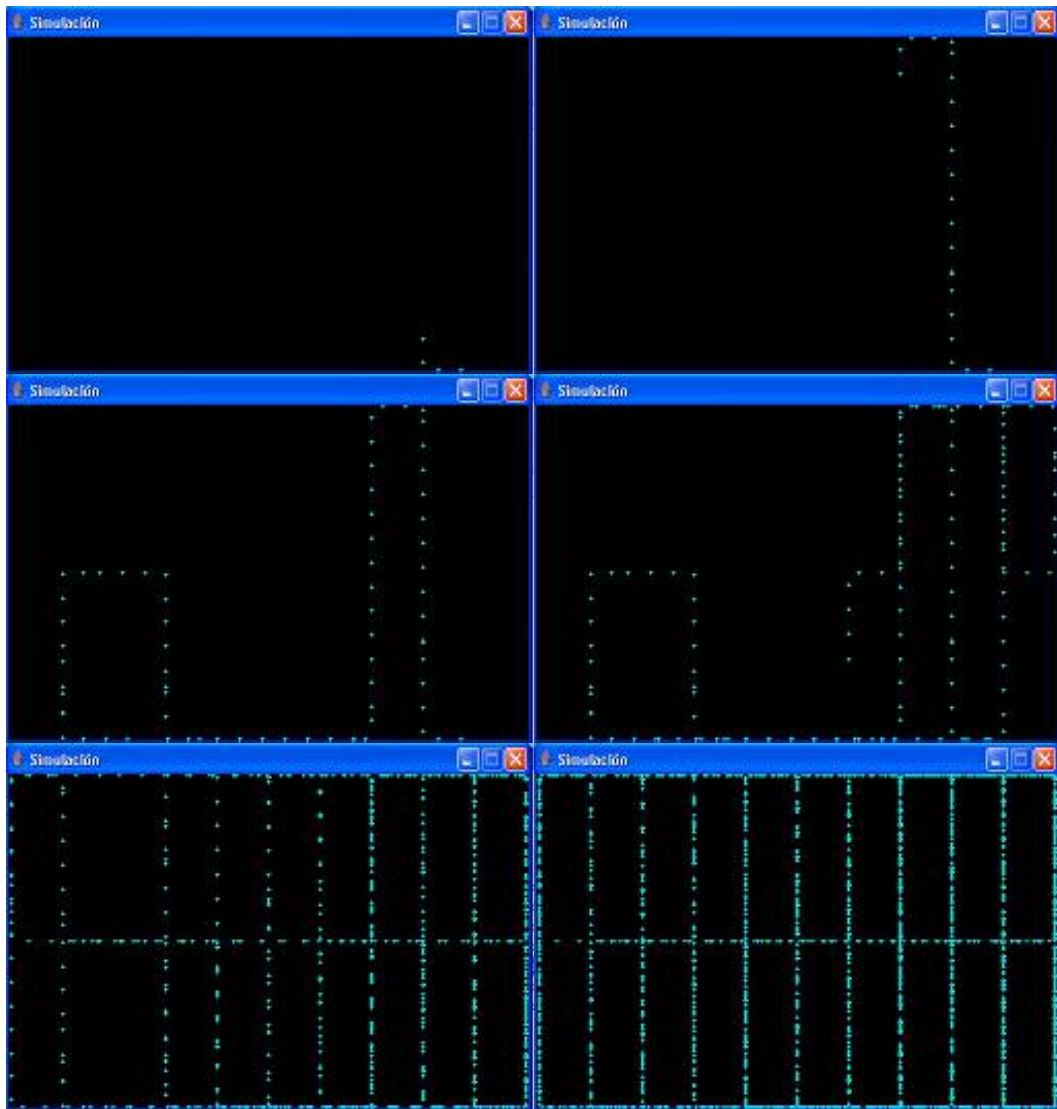


Figura 2.5 Patrón de movilidad MG

Las figuras muestran el modelo de movilidad MG de un nodo. En este ejemplo se muestra una sección de una ciudad de 20 manzanas con un nodo que comienza en la posición (x, y) aleatoria y que se mueve dejando un rastro que va dando forma a un escenario MG 500x300 metros. Cada punto representa donde está el nodo en cada segundo, y la distancia entre los puntos depende de la velocidad que lleve el nodo, cuanto más velocidad más separados estarán los puntos ya que en un segundo le habrá dado tiempo a recorrer más distancia.

El modelo MG proporciona movimientos reales dentro de una sección de una ciudad muy restrictiva con el movimiento de los nodos, en otras palabras se puede decir que los nodos están limitados a seguir rutas predefinidas cumpliendo un código de circulación definido (cotas de velocidad, prob. de pausa, etc.). En este modelo de movilidad los nodos no

tienen la capacidad de moverse libremente por el escenario debido a que no tienen la capacidad de moverse libremente haciendo caso omiso de obstáculos, y esto reflejará seguramente un mayor número de saltos que otros escenarios como RW o RPGM.

2.3.2. Random Waypoint (RW)

El modelo de movilidad RW es un modelo basado en la aleatoriedad de movimiento que tienen los nodos, cualquier nodo puede moverse por cualquier punto del escenario en cualquier dirección y sentido. También incluye opcionalmente periodos de pausa entre los cambios de dirección i/o sentido y puede permanecer quieto durante un tiempo de pausa determinado por los parámetros de la simulación. Tras una pausa el nodo toma una dirección aleatoria y una velocidad comprendida entre los umbrales especificados en los parámetros de simulación (minspeed, maxspeed).

A continuación se muestra una simulación donde se puede apreciar el funcionamiento de este patrón para un nodo.

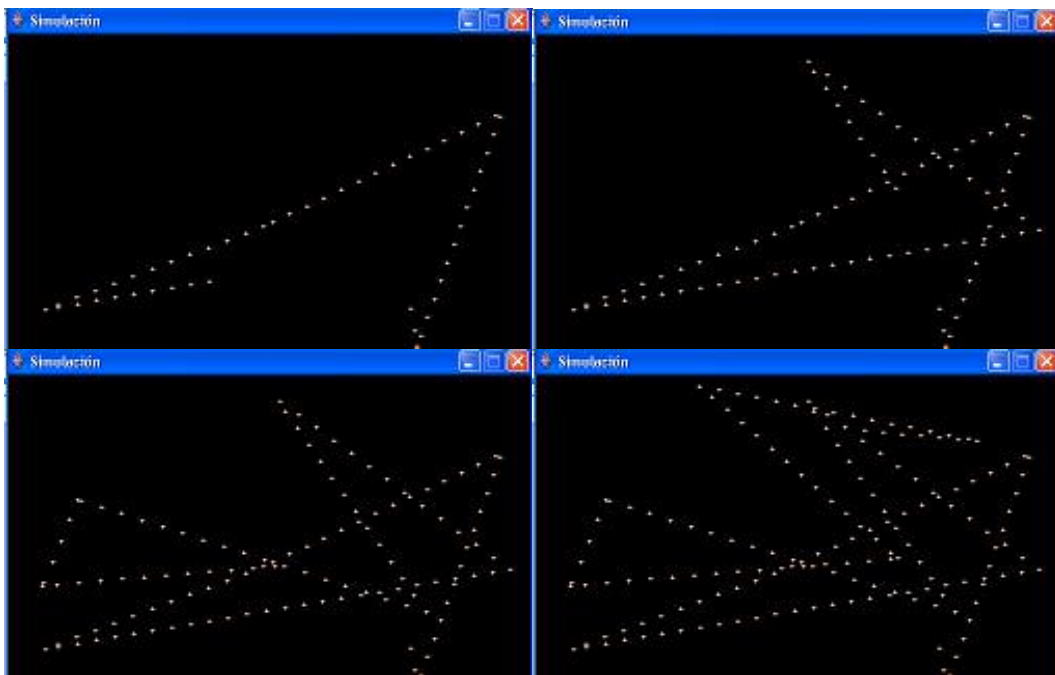


Figura 2.6 Patrón de movilidad RW



Figura 2.6 (continuación) Patrón de movilidad RW

En las primeras figuras se puede observar como el nodo no arranca en el punto (0,0) sino en una posición o punto aleatorio. Esto es gracias a que al generar el patrón de movimiento con Bonnmotion hemos tenido en cuenta que debíamos ignorar un tiempo inicial en el que el nodo pudiera desplazarse hasta un punto cualquiera del escenario. Para el caso que nos interesa, es decir donde hay más de un nodo, esto se traduce en una expansión de los nodos que asemeja más la simulación a un escenario real, donde no tienen por qué arrancar todos desde un mismo punto.

2.3.3. RPGM

El modelo de movilidad Reference Point Group Mobility (RPGM) representa el movimiento aleatorio de un grupo de nodos así como el movimiento individual de cada uno de estos nodos dentro del grupo con velocidades que siguen una distribución uniforme. Los movimientos del grupo están basados en el recorrido que realiza un centro lógico. El centro lógico del grupo se usa para calcular el movimiento del grupo mediante un vector de movimiento del grupo. El movimiento del centro del grupo define completamente el movimiento de su grupo y sus nodos correspondientes, y con ellos, su dirección y velocidad. Individualmente, cada nodo se mueve de manera aleatoria según su punto de referencia predefinido, el movimiento del cual depende el movimiento del grupo. Cuando los puntos de referencia individuales varían del instante de tiempo t a $t+1$, su posición se actualiza según el centro lógico del grupo. Una vez que se han actualizado los puntos de referencia $t+1$, se combinan con un vector de movimiento para representar el movimiento individual de cada nodo.

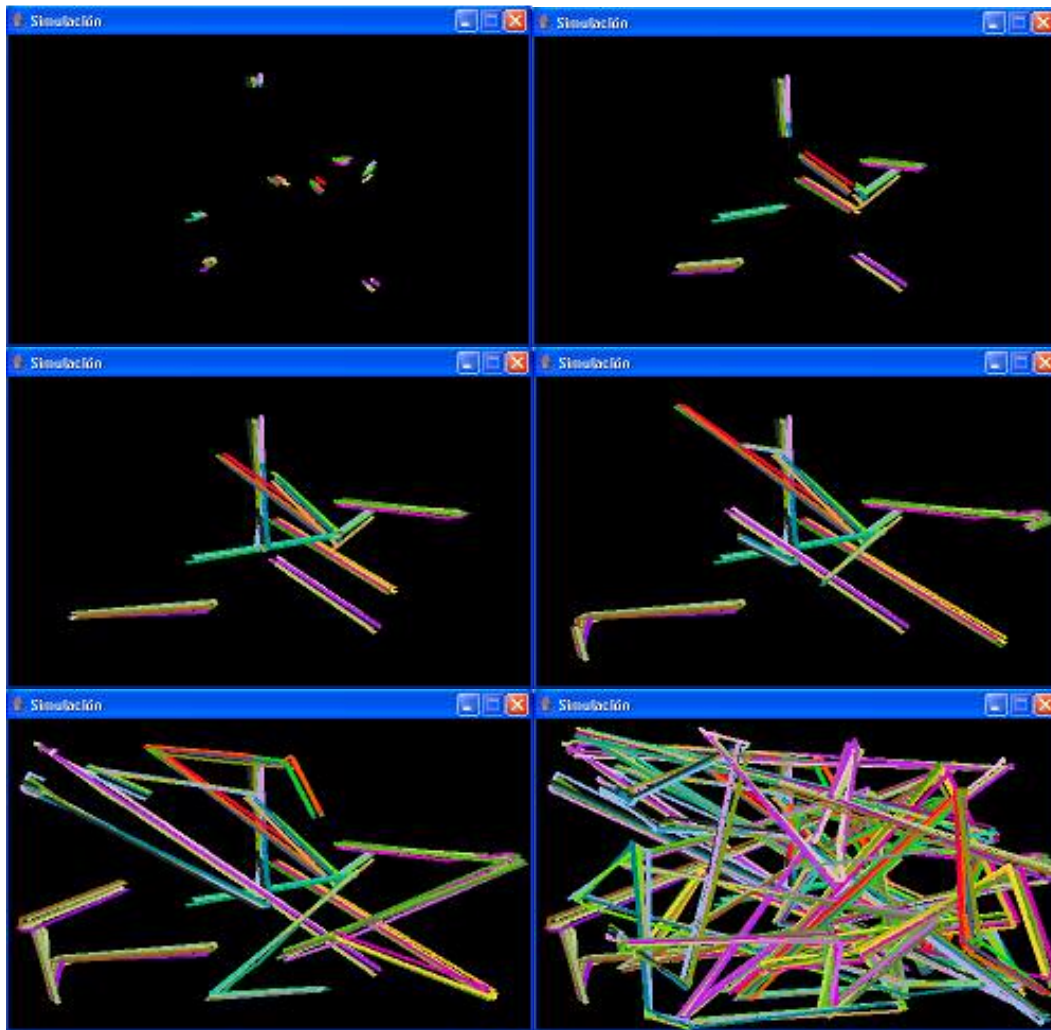


Figura 2.7 Patrón de movilidad RPGM

La figura muestra un escenario de 40 nodos donde se forman 8 grupos de nodos que inician su movimiento en diferentes puntos aleatorios del escenario. Tal y como se puede ver, el modelo RPGM hace servir un vector de movimiento para cada grupo. Las pausas se producen cuando un grupo alcanza un punto determinado, de manera que todos los nodos del grupo permanecen en pausa durante el mismo período de tiempo.

El modelo de movilidad RPGM fue diseñado para simular escenarios de equipos de rescate en operaciones de salvamento, movimiento de tropas del ejército, etc. En una situación de rescate, por ejemplo, es muy probable que se formen grupos con personas humanas y perros. En esta situación, se trabajará de manera conjunta. Los guías humanos, establecerán una ruta o camino para los perros, de forma que cada perro escogerá su propio “camino” en torno al área definida por el hombre.

CAPÍTULO 3. APLICACIONES DESARROLLADAS

A continuación se describe el funcionamiento de los programas diseñados y utilizados en este trabajo.

3.1. Analisis de la fuente de datos, Bonnmotion [6]

BonnMotion es un software implementado en Java que crea y analiza modelos de movilidad. Fue desarrollado dentro del grupo de sistemas de comunicación del instituto de informática de la universidad de Bonn, Alemania, donde sirve como herramienta para la investigación de las características de redes ad-hoc.

Bonnmotion soporta correctamente tres modelos de movilidad (existe un cuarto modelo que no se ha considerado en este trabajo por tener un error de funcionamiento):

- MG
- RW
- RPGM

Dentro de estos modelos permite establecer diferentes opciones a la hora de generar escenarios, de forma que el usuario puede especificar datos para ajustar al máximo la simulación a la realidad.

Entre estas opciones tenemos las siguientes:

<code>model=ManhattanGrid</code>	modelo de movilidad
<code>ignore=3600.0</code>	tiempo ignorado
<code>randomSeed=1138663487395</code>	semilla aleatoria movilidad
<code>x=200.0</code>	longitud eje X de escenario
<code>y=200.0</code>	longitud eje Y de escenario
<code>duration=600.0</code>	duración de simulación
<code>nn=10</code>	número de nodos
<code>circular=false</code>	movimiento circular
<code>turnProb=0.5</code>	probabilidad de giro
<code>speedChangeProb=2.0</code>	probabilidad cambio velocidad
<code>minSpeed=0.5</code>	velocidad mínima
<code>meanSpeed=1.0</code>	velocidad media
<code>speedStdDev=0.2</code>	desviación estandar velocidad
<code>pauseProb=5.0</code>	probabilidad de pausa
<code>maxPause=120.0</code>	tiempo máx. pausa

Otra funcionalidad de Bonnmotion es la capacidad que tiene de extraer estadísticas correspondientes a la simulación dando información es muy útil, donde es capaz de informar sobre:

- Número medio de vecinos ("avg. degree")
- Grupos de nodos o subredes ("partitions")
- Número medio de vecinos ("partitioning degree")
- Tiempo medio de enlace roto ("avg time to link break")
- Desviación estándar del tiempo de enlace roto ("std deviation of time to link break")
- Tiempo medio de enlace ("avg link duration")
- Enlaces totales ("total links")
- Enlaces rotos ("link breaks")

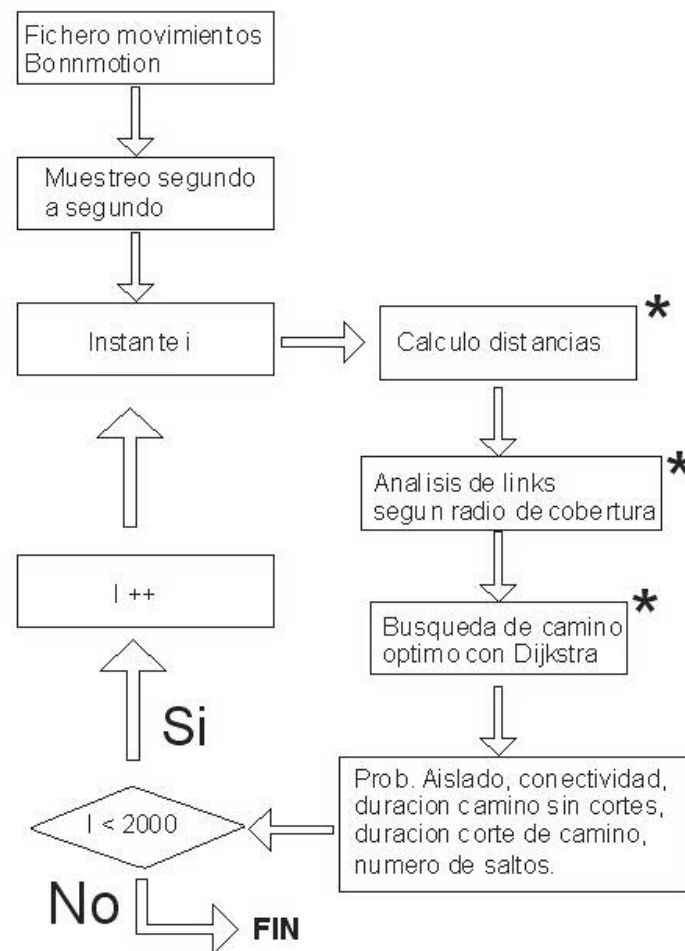
3.2. Entorno de desarrollo y aplicaciones: AHP + AHG

Para el desarrollo de las aplicaciones de análisis de conectividad y topología se han utilizado Visual c# y Java, ambas consideradas como plataformas de programación orientadas a objetos donde se expresa un programa como un conjunto de estos objetos, que colaboran entre ellos para realizar tareas. Esto permite hacer los programas y módulos más fáciles de escribir, mantener y reutilizar.

De esta forma, un objeto contiene toda la información, (los denominados atributos) que permite definirlo e identificarlo frente a otros objetos pertenecientes a otras clases (e incluso entre objetos de una misma clase, al poder tener valores bien diferenciados en sus atributos). A su vez, dispone de mecanismos de interacción (los llamados métodos) que favorecen la comunicación entre objetos (de una misma clase o de distintas), y en consecuencia, el cambio de estado en los propios objetos. Esta característica lleva a tratarlos como unidades indivisibles, en las que no se separan (ni deben separarse) información (datos) y procesamiento (métodos).

3.2.1. Esquema general

A continuación se muestra un esquema inicial del algoritmo que debe seguir el software AHP.



* Realizado para todos los nodos contra todos los demás

Figura 3.1 Esquema general de funcionamiento para AHP

Este esquema representa una idea general de los pasos que debe seguir el software, aunque posteriormente en la práctica aparecerán numerosos incisos que deberán resolverse. Un ejemplo de esto es el formato que se debe dar al fichero de entrada antes de tratarlo, o tratar la desaparición de nodos de forma que no afecte a los resultados finales falseando la media aritmética final.

3.2.2. Componentes

Partiendo de una base analítica se llega a la conclusión de que el volumen de variables del problema, el nivel de cálculo que requiere y en resumen la gran cantidad de datos que se quiere manejar requiere la automatización de numerosos procesos que sean capaces de proporcionar resultados en un tiempo razonable. Concretando un poco lo que se quiere realizar, se plantean determinados parámetros para realizar un diseño previo. Esto consta de una simulación de duración limitada donde en cada instante del periodo especificado se calcularán los siguientes puntos para un conjunto de velocidades (1, 5, 10, 15, 20 m/s) y número de nodos (10, 20, 30, 40):

- las distancias de todos contra todos para cada instante
- los links que se establecen según las distancias obtenidas y según cada radio de cobertura de 10 a 100 metros aumentando 10 metros cada vez
- el número de saltos de un nodo a cada uno de sus vecinos tras calcular Dijkstra
- las probabilidades de aislamiento de un nodo cualquiera
- las probabilidades de conectividad de un nodo cualquiera
- el número medio de saltos de un camino
- probabilidad de que un camino tenga un número de saltos
- tiempo medio de corte de un camino
- tiempo medio de conectividad sin cortes de un camino

en definitiva, se trata de todos aquellos datos que se han considerado interesantes y que Bonnmotion no proporciona.

Una vez planteado el organigrama de funcionamiento empezamos a trabajar con objetos entre los cuales tenemos:



Figura 3.2 Clases definidas en AHP

BD

Este fichero representa la base de datos del programa ya que incluye todas las funciones principales del programa que se encargan de realizar casi todos los cálculos de la simulación. Dentro de BD podemos encontrar las funciones necesarias para procesar las tareas que se describen a continuación.

Para empezar se realiza la apertura del fichero de entrada procedente de Bonnmotion *.movements, donde cada fila representa un nodo. En todos los nodos se especifica el movimiento con un formato concreto:

Instante₁ posicionX₁ posicionY₁ ... Instante_i posicionX_i posicionY_i

El problema es que los instantes no son periódicos y, por ejemplo podemos obtener el instante $t_2 = 60s$ después del instante $t_1 = 13s$ con lo cual no es posible saber donde estaba el nodo en un instante intermedio. Este problema lo soluciona AHP vectorizando la velocidad y representando una recta entre las posiciones respectivas de ambos instantes consecutivos mediante puntos calculados a partir de las posiciones intermedias válidas para cada instante.

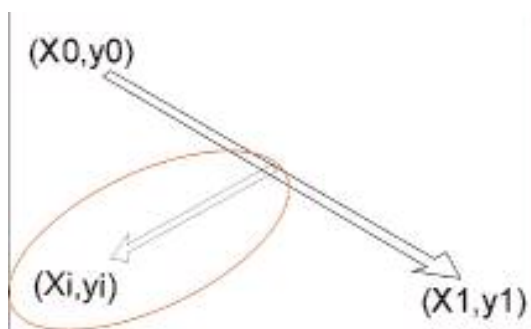


Figura 3.3 Solución al problema de los instantes no periódicos

De esta forma se hace necesario calcular mediante vectores las posiciones de los nodos para cada segundo (instantes consecutivos, ej.: $t_0=0$, $t_1=1$, $t_2=2, \dots, t_i=i$) ya que Bonnmotion proporciona las posiciones para instantes aleatorios. Una vez se conoce la posición de todos los nodos para cada instante se siguen los siguientes pasos:

- A partir de las posiciones en cada instante se calculan las distancias de todos contra todos y en función de estas distancias se analiza entre qué nodos se produce un enlace directo (*link*).

- Una vez conocidos los *links* se aplica el algoritmo de Dijkstra que se utiliza en este punto para conocer a que vecinos llega cada nodo y con qué número de saltos, siempre utilizando el camino óptimo.
- Tras aplicar Dijkstra sabemos a quién llega cada nodo, y durante cuánto tiempo, lo cual permite calcular la probabilidad de aislamiento de un nodo.
- Dijkstra también nos dará información de que coste tiene cada camino (suponiendo que cada enlace directo tiene coste 1) y con esto se obtendrá el número de saltos de cada camino.
- Además de la precisión que obtenemos al analizar cada escenario segundo a segundo, también gracias a esto podemos saber con precisión cuantos instantes estuvo cada camino establecido, y con ello calcular el tiempo medio de conectividad sin cortes de un camino.
- De la misma forma podremos realizar los cálculos para obtener el tiempo medio de corte o inactividad en un camino.

Nodo

La clase Nodo se compone principalmente de atributos. Estos atributos almacenan información correspondiente a cada nodo del escenario, información que posteriormente se utilizará para poder diferenciar cada nodo y también saber en que posición se encuentra, es decir, conocer su posición X,Y en cada instante:

```
public int nn;  
public ArrayList instante = new ArrayList();  
public ArrayList valorX = new ArrayList();  
public ArrayList valorY = new ArrayList();
```

En cuanto a ejecutar posteriormente el algoritmo de Dijkstra se realiza utilizando también la clase Nodo donde se hace necesario incorporar 2 vectores nuevos que almacenen las conexiones que tiene un nodo con cada vecino y de cuantos saltos es el camino que une cada par de nodos. Como veremos posteriormente Dijkstra es capaz de calcular el camino óptimo conociendo estos dos parámetros.

```
public Vecinos[] conexiones;  
public Camino[] caminos;
```

Camino

Para nuestro estudio un camino es una concatenación de enlaces entre origen y destino y en el cual hay que considerar características imprescindibles para poder analizarlo. Por tanto necesitaremos poder diferenciar cada camino con un `idCamino`, conocer aspectos como la duración total de conectividad del camino, saber en qué instantes está activo y cuándo no lo está, los cortes que tiene durante toda la simulación y también los reestablecimientos que se producen.

```
public int idCamino;  
public int duracion;  
public int cortes;  
public int reestablecimientos;  
public bool estado;
```

Vecinos

La clase Vecinos hace referencia a un vecino en concreto, es decir almacena la información referente a un único vecino por eso en la clase nodo se instancia un vector de este objeto ya que se puede tener más de un vecino. Hemos considerado que la información que se requiere de un vecino es saber de quien se trata y a cuantos saltos se encuentra de cualquier otro nodo.

```
public int peso;  
public int dest;
```

Tiempo

Este objeto representa la simulación en cada uno de sus instantes proporcionando información sobre el instante en que nos encontramos, cuantos nodos existen en ese instante, en que posición X,Y se encuentra cada uno de ellos, que distancia (en metros) separa unos de otros y en consecuencia cuantos links se producen en función de la distancia calculada.

```
public ArrayList nn = new ArrayList();  
public ArrayList instantes = new ArrayList();  
public ArrayList X = new ArrayList();  
public ArrayList Y = new ArrayList();  
public ArrayList distancia = new ArrayList();  
public ArrayList link = new ArrayList();
```

Dijkstra [7] [8]

El algoritmo se atiene a la estrategia conocida como esquema de algoritmo voraz. Dijkstra por definición conoce de antemano los costes de cada enlace pudiendo ser diferentes a un salto. Para nuestro caso no es exactamente así debido a que previamente solo conocemos enlaces con coste de un salto, por tanto primero debemos descubrir las posibles rutas entre origen y destino, y posteriormente escoger el camino óptimo (Dijkstra). La idea subyacente en este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos más cortos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino más corto desde el vértice origen, al resto de vértices que componen el grafo, el algoritmo se detiene.

3.2.3. Cálculo de parámetros de conectividad y topología

3.2.3.1. Probabilidad de nodo aislado

Para obtener este dato lo que se hace, es analizar en cada segundo de la simulación que nodos están aislados, es decir cuantas veces un nodo no tiene conectividad con ningún otro nodo. Al final se divide el total de instantes en que el nodo se encontraba aislado entre el total de instantes de la simulación, y posteriormente se realiza una media aritmética de los resultados obtenidos entre todos los nodos. Este dato nos informará sobre que requisitos tienen que cumplirse en un escenario determinado para asegurar un mínimo de conectividad.

```
Probabilidad Nodo 1 aislado: 40/1556 = 0,025706940874036
Probabilidad Nodo 2 aislado: 279/1556 = 0,179305912596401
Probabilidad Nodo 3 aislado: 611/1556 = 0,3926735218509
Probabilidad Nodo 4 aislado: 242/1556 = 0,155526992287918
Probabilidad Nodo 5 aislado: 473/1556 = 0,303984575835476
Probabilidad Nodo 6 aislado: 353/1556 = 0,226863753213368
Probabilidad Nodo 7 aislado: 493/1556 = 0,316838046272494
Probabilidad Nodo 8 aislado: 470/1556 = 0,302056555269923
Probabilidad Nodo 9 aislado: 157/1556 = 0,100899742930591
Probabilidad Nodo 10 aislado: 512/1556 = 0,329048843187661
```

```
Probabilidad promedio Nodo aislado:
```

```
2,33290488431877/10 = 0,233290488431877
```

3.2.3.2. Probabilidad de conectividad extremo a extremo

En cuanto a conectividad lo que nos interesa saber es que conectividad se puede asegurar para un determinado escenario. La forma de averiguar este dato se realiza mediante un muestreo segundo a segundo para todo el periodo de simulación en el que se va analizando a cuantos vecinos llega cada nodo y que promedio se alcanza con la conectividad de sus vecinos. A continuación se expone un ejemplo para un escenario de 10 nodos:

```

•      3/9 = 0,3333333333333333 //Nodo 1 llega a 3 vecinos
3/9 = 0,3333333333333333 //Nodo 1 llega a 3 vecinos
1/9 = 0,1111111111111111 //Nodo 1 llega a 1 vecino
1/9 = 0,1111111111111111 //Nodo 1 llega a 1 vecino
0/9 = 0 //Nodo 1 llega a 0 vecinos
3/9 = 0,3333333333333333 //Nodo 1 llega a 3 vecinos
1/9 = 0,1111111111111111 //Nodo 1 llega a 1 vecino
1/9 = 0,1111111111111111 //Nodo 1 llega a 1 vecino
3/9 = 0,3333333333333333 //Nodo 1 llega a 3 vecinos
0/9 = 0 //Nodo 1 llega a 0 vecino

1,7777777777777778/10 = 0,1777777777777778 //Conectividad media del 17'8%

```

Hasta aquí habríamos representado el promedio para un instante, pero la conectividad final correspondiente a un nodo cualquiera se obtiene teniendo en cuenta todos los instantes de forma que nuestro resultado final sería algo como lo que se expone a continuación siguiendo el mismo ejemplo:

```

Probabilidad promedio de conectividad extremo a extremo de un nodo:
Suma de conectividad media de todos los instantes = 422,888888888888
Total instantes = 1556
422,888888888888/1556 = 0,271779491573836 // Conectividad final 27%

```

3.2.3.3. Número de saltos extremo a extremo

Sabemos que un el número de saltos de un camino afecta directamente a los niveles de throughput de cada enlace dividiendo el ancho de banda de los nodos entre el numero de flujos que deban soportar. También somos conscientes que todos los terminales que deban reenviar información consumirán energía de forma que cuantos más saltos tenga nuestro camino más energía se invertirá en la comunicación. Estos y otros aspectos hacen necesario tener un conocimiento de cómo serán los caminos que se generara en cada escenario, por tanto es muy interesante conocer que porcentaje de caminos consta de 'x' saltos. Siguiendo un ejemplo

correspondiente al caso anterior podríamos obtener algo como lo que se expone a continuación:

```
Total saltos: 5941
1 saltos:4959/5941      83,4707961622622 % caminos de 1 salto
2 saltos:897/5941      15,0984682713348 % caminos de 2 saltos
3 saltos:83/5941       1,39707120013466 % caminos de 3 saltos
4 saltos:2/5941        0,033664366268305 % caminos de 4 saltos
5 saltos:0 0 %
6 saltos:0 0 %
7 saltos:0 0 %
8 saltos:0 0 %
9 saltos:0 0 %
```

En este ejemplo se puede apreciar como el porcentaje de caminos de 1 salto es muy superior al porcentaje correspondiente para caminos de más de 1 salto. Esto combinado con una conectividad elevada sería un buen ejemplo de red ad-hoc ideal para dispositivos con limitaciones de ancho de banda y energía.

3.2.3.4. Tiempo medio de camino sin cortes

Sabemos que los protocolos de transporte más populares utilizados hoy están orientados a conexión y preparados para funcionar en redes con baja BER y nodos estáticos o con baja movilidad. Esto hace que cualquier pretensión de poder utilizarlo en redes con nodos móviles que generan numerosas roturas en sus rutas requeriría de mecanismos que adaptasen el protocolo a las características de la red. Para esto es necesario conocer que deficiencias se producirían a consecuencia de utilizarlo y para ello es muy importante conocer la duración media de un camino sin cortes de tx.

Este cálculo se extrae contabilizando todos los instantes que cada camino está activo, y posteriormente cuantos cortes y reestablecimientos ha sufrido. Una vez conocemos estos datos es fácil extraer la duración media que un camino está activo y la duración media que un camino está inactivo. Para un caso con diez nodos nos realizaría los cálculos para 90 caminos ya que los enlaces de *loopback* no se consideran enlaces, el siguiente ejemplo es lo que obtenemos tras los cálculos:

```
Camino 1 tiene un TMC: 0 //TMC - Tiempo Medio Corte  
Camino 1 tiene un TME: 0 //TME - Tiempo Medio Enlace
```

```
...
```

```
...
```

```
Camino 96 tiene un TME: 742  
Camino 97 tiene un TMC: 22  
Camino 97 tiene un TME: 744  
Camino 98 tiene un TMC: 96  
Camino 98 tiene un TME: 1363  
Camino 99 tiene un TMC: 30  
Camino 99 tiene un TME: 732  
Camino 100 tiene un TMC: 0  
Camino 100 tiene un TME: 0
```

```
Tiempo medio de corte: 2256/90 = 25  
Tiempo medio de enlace: 79918/90 = 887
```

El camino 1 y 100 son de *loopback* y no interfieren en los cálculos debido a que suman cero y se descartan en el denominador del calculo final, el motivo de esto es que en un escenario con 10 nodos solo existen 90 caminos posibles donde el mismo nodo no puede ser origen y destino (*loopback*).

3.2.4. Interfaz de usuario, parámetros y resultados

La idea presentada en el punto anterior queda integrada en un paquete de software llamado AHP que permite obtener resultados numéricos de conectividad y topología ofreciendo un par de interfaces de usuario.

También se ha considerado interesante obtener resultados gráficos de conectividad y topología, por ello se ha desarrollado un segundo software capaz de representar en tiempo real el progreso del escenario durante todo el periodo de simulación.

3.2.4.1. AHP



De cara al usuario, AHP ofrece dos interfaces gráficas. Cada interfaz contiene una pequeña explicación para cada campo que aparece en un campo de texto cuando hacemos clic en cada caso. La primera interfaz que aparece al ejecutar AHP permite especificar previamente los directorios de entrada y de salida. En el directorio de entrada deberá existir un fichero fuente generado con Bonnmotion y con extensión *.movements. En el directorio

de salida aparecerán todos los ficheros generados por AHP donde se podrán consultar los resultados obtenidos. A continuación se muestra la interfaz en cuestión:

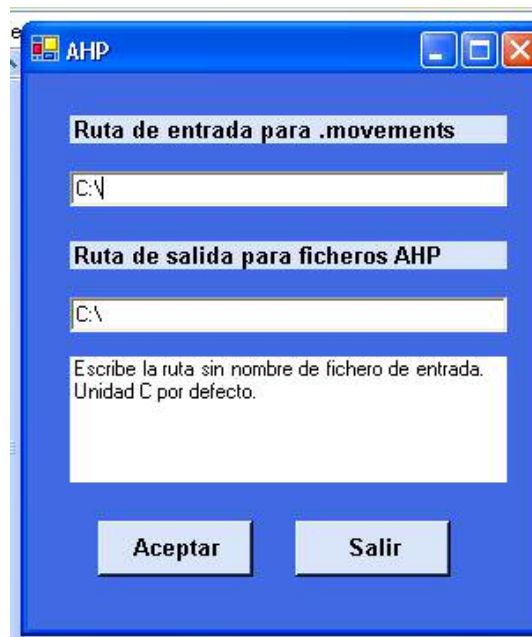


Figura 3.4 Interfaz primaria de AHP

Una vez hemos definido nuestros directorios de entrada y de salida, confirmamos apretando 'Aceptar' y parecerá una segunda interfaz gráfica donde deberemos especificar los parámetros que va a seguir nuestra simulación. Bastará con introducir el nombre del fichero procedente de Bonnmotion, un nombre para los ficheros de salida que genera AHP, un radio de cobertura cualquiera, y un índice que defina la resolución que deberá tener el muestreo de nuestra simulación, es decir, cada cuanto tiempo se quiere analizar la conectividad, aislamiento, caminos, etc. dentro del escenario.

The screenshot shows a Windows-style application window titled 'AHP'. The interface is organized into four main sections. The top-left section has a button 'Introduce fichero de entrada' and a text input field with the value '.movements'. The top-right section has a button 'Intervalos de tiempo para muestreo' and a text input field with the value '(segundos)'. The middle-left section has a button 'Introduce nombre ficheros de salida' and a text input field with the value '.pos .dis .link .cost .aisl .conect'. The middle-right section has a button 'Introduce radio de cobertura' and a text input field with the value '(metros)'. At the bottom left, there is a large text box containing the instruction: 'Escribe el nombre (sin extensión) del fichero de entrada. Este fichero debe ser del tipo .movements'. At the bottom center, there are two buttons: 'Generar' and 'Salir'.

Figura 3.5 Intefaz secundaria AHP

Una vez introducidos los parámetros podemos dirigirnos al directorio que hemos especificado como directorio saliente y revisar los ficheros que aparecen allí. Comprobaremos que tenemos ficheros con el mismo nombre pero diferentes extensiones: *.pos, *.aisl, *.pathtime, *.costpath, *.conect, *.cost. Cada uno de estos ficheros contiene información de lo comentado en el capítulo 2, probabilidades de conectividad, aislamiento, duración de caminos sin cortes, etc.

3.2.4.2. Representación de movimientos con AHG

Un primer paso para la realización del estudio de MANET es la utilización de Bonnmotion como generador de información, pero se ha considerado interesante evaluar esta información de forma que se pueda verificar como útil para realizar cálculos sobre ella y obtener resultados de comportamiento del sistema. Este punto nos lleva a diferenciar entre un “análisis de comportamiento gráfico” y un “análisis de comportamiento matemático”. El primero nos proporcionará un interfaz donde se pueda observar que los nodos cumplen los parámetros marcados, que se respetan las dimensiones del escenario, que los puntos calculados para cada instante son consecutivos, que a velocidades superiores los puntos están más distantes que a velocidades inferiores, y en definitiva que la fuente de información es fiable, en este caso Bonnmotion.

La generación de este software puede parecer infructuosa a nivel de resultados pero es importante que nos aseguremos que trabajamos sobre

una base correcta, y gracias a las simulaciones que genera podemos verificar que cada escenario cumple los parámetros establecidos.

Cabe comentar que existe un patrón de movilidad no estudiado en este proyecto debido a que no es generado correctamente por Bonnmotion, el patrón *Gauss Markov* concretamente no funciona correctamente debido a que cuando un nodo del escenario alcanza un extremo del escenario este cede agrandándose inesperadamente.

En este apartado explicaremos el funcionamiento de este software de representación gráfica sin indagar en su estructura interna para no extender el trabajo de forma excesiva.

El funcionamiento de esta herramienta es muy sencillo. El grafo obtenido tras su ejecución se calcula en base a uno de los ficheros proporcionados por AHP, el fichero *.pos que es donde se almacenan las posiciones de los nodos para cada instante. Esto se ha realizado así debido a que no se puede utilizar el fichero *.movements generado por Bonnmotion directamente ya que éste no sigue un patrón periódico en cuanto a los instantes consecutivos que ofrece. Por tanto habrá que ejecutar AHP, obtener el *.pos y posteriormente ejecutar la simulación gráfica como en el siguiente ejemplo:



Figura 3.6 Interfaz para AHG

La ejecución de esta aplicación generará una ventana ajustada a las dimensiones del escenario a escala píxel/metro donde cada nodo adquirirá un color aleatorio que lo diferenciará de los demás.

Al realizar simulaciones para diferentes velocidades en el movimiento de los nodos apreciamos que a velocidades elevadas la evolución del escenario se producía muy rápidamente sin poder llegar a apreciar bien si los parámetros establecidos se comportaban tal como se habían definido, para velocidades bajas el escenario evolucionaba con excesiva lentitud haciendo de la simulación una tarea interminable. Por este motivo se introdujo una opción de retardo que ajusta la velocidad de dibujado de forma que se pueda apreciar el progreso cómodamente, donde la velocidad viene

diferenciada por la distancia entre los sucesivos puntos que definen el movimiento de un nodo, y por tanto a mayor velocidad mayor distancia entre puntos. Veamos el escenario que se genera siguiendo el mismo ejemplo:

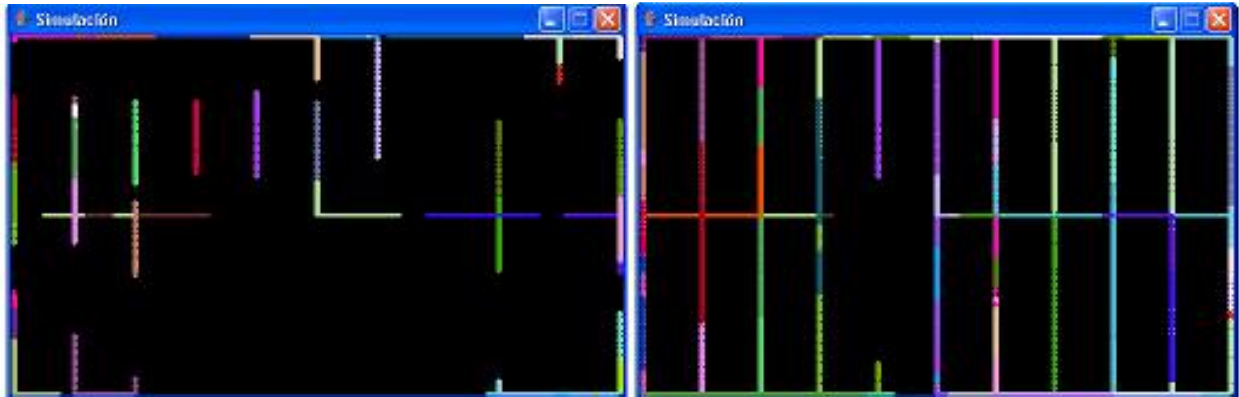


Figura 3.7 Simulación a velocidad baja

Efectivamente los puntos se repintan muy próximos unos de otros ya que los nodos van a 1 m/s. Ahora veamos que pasa si variamos la velocidad a 20 m/s:

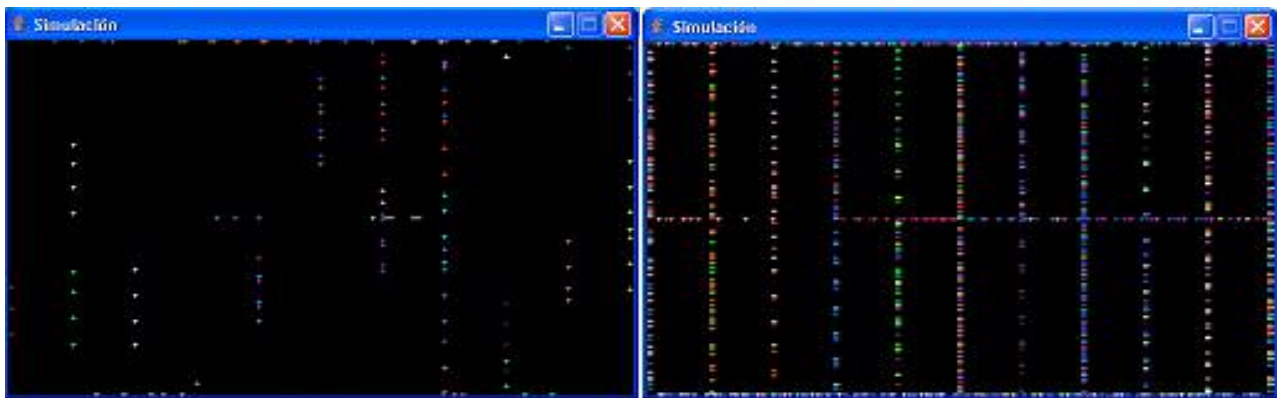


Figura 3.8 Simulación a velocidad alta

En este caso también se cumple lo comentado con anterioridad, se aprecia con claridad como cada nodo es capaz de recorrer más distancia en el mismo periodo de tiempo, es decir mirando el grafo aumenta la distancia entre un punto y el siguiente del mismo color.

Capítulo 4. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este capítulo se muestran y analizan la probabilidad de nodo aislado, la conectividad extremo a extremo, el número de saltos para un camino y el tiempo de camino sin cortes.

4.1. Parámetros de las simulaciones

Los resultados se corresponden a simulaciones realizadas para MG, RW y RPGM con densidades de 10, 20, 30, y 40 nodos, velocidades que abarcan los 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, y 20 m/s, y radios de cobertura comprendidos entre los 10 y 100 metros.

Los parámetros preestablecidos en cada escenario son los siguientes:

<pre> model=ManhattanGrid ignore=1000.0 randomSeed=1137780833459 x=500.0 y=300.0 duration=2000.0 nn=10 circular=false xblocks=10 yblocks=2 updateDist=10.0 turnProb=0.3 speedChangeProb=0.1 minSpeed=0.9 meanSpeed=1.1 speedStdDev=0.2 pauseProb=0.1 maxPause=30.0 </pre>	<pre> model=RandomWaypoint ignore=1000.0 randomSeed=1137411256075 x=500.0 y=300.0 duration=2000.0 nn=10 circular=false dim=3 minspeed=0.9 maxspeed=1.1 maxpause=30.0 </pre>	<pre> model=RPGM ignore=1000.0 randomSeed=1138640501027 x=500.0 y=300.0 duration=2000.0 nn=10 circular=false groupsize_E=5.0 groupsize_S=2.0 pGroupChange=0.3 maxdist=10.0 minspeed=0.9 maxspeed=1.1 maxpause=30.0 </pre>
---	---	---

Figura 4.1 Parámetros para cada escenario

Estos datos corresponden al caso de 10 nodos y 1 m/s. Para ejecutar los escenarios correspondientes a otras velocidades y densidades, únicamente sustituimos el valor resaltado en rojo por el deseado y ejecutamos.

Cada simulación tiene una duración de 3000 segundos, pero sólo 2000 de ellos se tienen en cuenta ya que los 1000 primeros se ignoran porque Bonnmotion arranca el escenario iniciando todos los nodos desde el mismo punto. Este fenómeno podría falsear los resultados, por tanto una forma de evitar esto es ignorar el movimiento inicial durante un periodo de tiempo para que la distribución de los nodos alcance un régimen permanente.

Los escenarios mantienen algunas características comunes, las dimensiones del escenario no varían, son siempre de 500x300 metros, y los movimientos circulares no se permiten en ningún caso.

En algunos escenarios existen opciones particulares:

- En MG se divide el escenario (rejilla) en 10x2 bloques totales que simulan ser 20 edificios o manzanas de una ciudad. Por tanto haciendo cálculos sabemos que los edificios serán de 50 m de ancho por 75 m de largo.
- En RPGM se considera el número máximo y mínimo de nodos que puede tener un grupo. También se tiene en cuenta la probabilidad de que un nodo cambie de grupo, que para nuestro caso es de 0,3.

4.2. Probabilidad de nodo aislado

A continuación se muestran los resultados para el modelo MG.

MG AISLAMIENTO

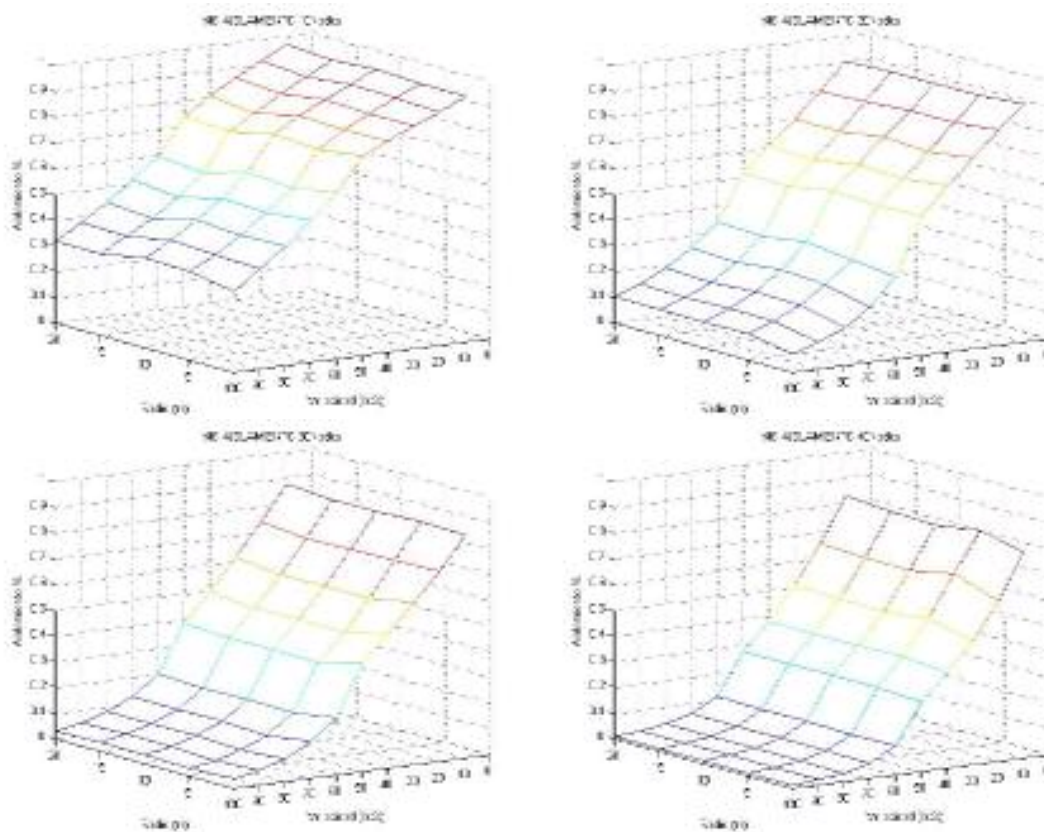


Figura 4.2 Gráficas aislamiento MG

MG AISLAMIENTO 10 nodos

Como era previsible la gráfica muestra una tendencia decreciente con el radio de cobertura. Vemos como 10 nodos no supone una densidad suficiente para asegurar un mínimo de conectividad en la red, también se aprecia como de 50 a 60 metros de cobertura se produce un descenso más notable que para otros radios, este fenómeno va ligado a las dimensiones del escenario ya que para todas las densidades se manifiesta de la misma forma por tanto es independiente a la densidad de nodos. Si la explicación de esto no está en la densidad es porque su justificación reside en uno de los aspectos que caracterizan MG. Cuando un nodo alcanza un radio de cobertura superior al ancho de un rectángulo de la cuadrícula (edificio) es capaz de llegar repentinamente a vecinos de caminos paralelos al suyo y ya no queda limitado únicamente a su camino. La probabilidad que un nodo esté aislado es de un 31% para el mejor de los casos. Respecto a la velocidad se pueden apreciar pequeñas variaciones pero se podría decir que la probabilidad que un nodo esté aislado es independiente a la velocidad de los nodos, igual que pasaba con la conectividad.

MG AISLAMIENTO 20 nodos

En este caso se duplica la densidad y se forma una curva que representa una probabilidad mínima de nodo aislado del orden del 10%. La probabilidad que un nodo esté aislado con un radio pequeño desciende un 5% pero aun así sigue siendo muy alta, 95%.

MG AISLAMIENTO 30 nodos

Aumentando de nuevo la densidad se aprecia como la curva sigue descendiendo. En este caso tenemos una probabilidad de aislamiento del 3% para el mayor radio de cobertura, para la cobertura más baja también varía descendiendo hasta el 87% un 8% respecto al caso anterior. Vemos también cómo continúa apareciendo el notable descenso que apreciamos en las gráficas anteriores entre los 50 y 60 metros de radio.

MG AISLAMIENTO 40 nodos

Una vez más vuelve producirse un descenso de la curva, esta vez hasta el 80% para el radio más pequeño, y 1% para el radio más grande. En este último caso podría decirse que hemos alcanzado un punto casi óptimo donde se asegura que la probabilidad que un nodo esté aislado es del 1%.

RW AISLAMIENTO

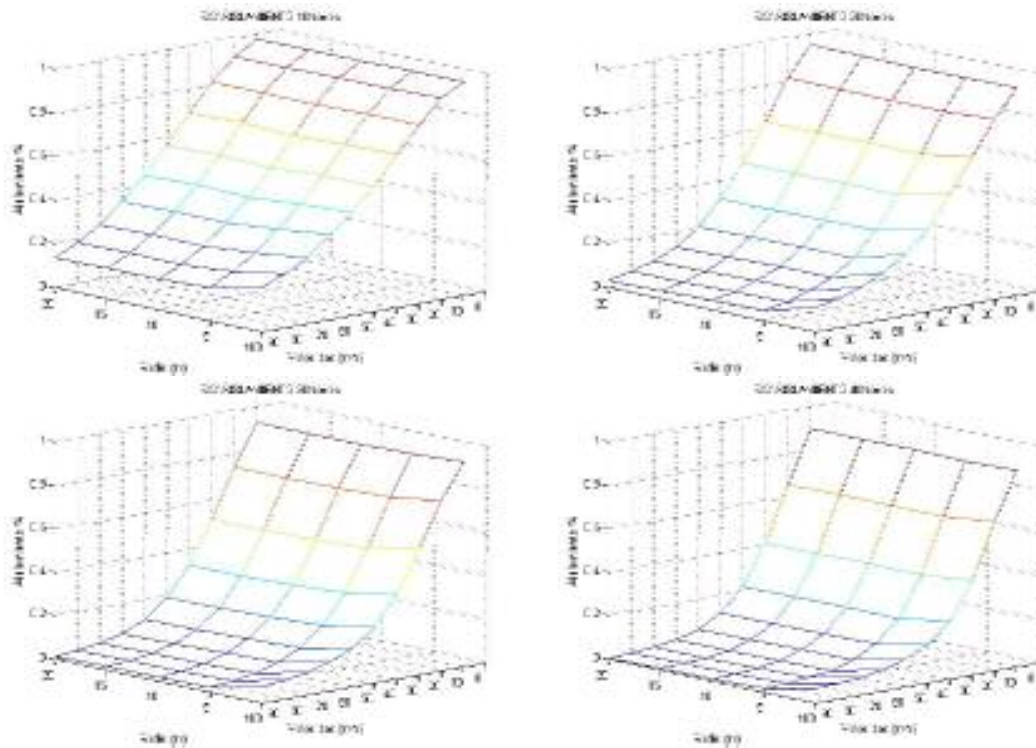


Figura 4.3 Gráficas aislamiento RW

RW AISLAMIENTO 10 nodos

En esta gráfica se representa el aislamiento para RW. Como era previsible la gráfica muestra una curvatura decreciente con el decremento del radio de cobertura. En este caso 10 nodos no supone una densidad suficiente para asegurar un mínimo de conectividad en la red, igual que ocurría en MG10, de hecho a simple vista se puede apreciar como existe un parecido entre esta curva y la observada anteriormente en MG, aunque ahora la curva es más vertical y tiene mayor probabilidad de aislamiento (97%) para radios pequeños y menor (13%) para radios grandes.

Si indagamos en los detalles veremos que para este caso la curva crece de forma más suave, es decir no se producen descensos ni aumentos notablemente bruscos para ninguno de los radios de cobertura. Este fenómeno viene dado por la libertad que tienen los nodos en cuanto a movilidad, porque en este caso no hay que alcanzar radios mínimos para sobrepasar obstáculos y así llegar a más nodos como era el caso en MG por el ancho de los “edificios”.

En cuanto a velocidades no se observan variaciones importantes, el aislamiento para los mismos nodos a velocidades diferentes es prácticamente el mismo. Solamente en 1 m/s podemos observar una pequeña diferencia. Este fenómeno se debe a que tratándose de una simulación limitada a 2000 segundos, cuando la velocidad es baja los

nodos recorren menos distancia total y se mantienen durante más tiempo en cada punto que recorren. Esto puede suponer dos cosas, la primera es que estén cerca unos de otros durante más tiempo y no de tiempo a que se produzcan tantos cambios como a velocidades superiores (mayor conectividad a velocidad baja), la segunda es que estén lejos unos de los otros durante más tiempo y no de tiempo a que se produzcan tantos cambios como a velocidades superiores (sería el caso en que nos encontramos).

RW AISLAMIENTO 20 nodos

El caso con 20 nodos supone una densidad casi suficiente para asegurar un mínimo de conectividad en la red. Ahora la curva es aun más vertical, con probabilidad de aislamiento máximo del 95% para radios pequeños y probabilidad de aislamiento mínima del 3,3% para radios grandes.

En cuanto a velocidades no se observan variaciones importantes, aunque existe un pequeño descenso a medida que aumentamos la velocidad pero el aislamiento para los mismos nodos a velocidades diferentes sigue siendo prácticamente el mismo. Solamente en 1 m/s se vuelve a observar una diferencia más marcada igual que en caso anterior donde se explicó el porqué.

RW AISLAMIENTO 30 nodos

En esta gráfica se alcanzan resultados casi óptimos para radios grandes, del orden del 1% de probabilidad de aislamiento. En cambio, para radios pequeños se aprecia como un aumento insuficiente en la densidad de población no supone grandes mejoras en cuanto a parámetros de aislamiento, alcanzando así una probabilidad de aislamiento del 94%. En cuanto a la velocidad se aprecia como sigue jugando un papel casi imparcial también para esta densidad.

RW AISLAMIENTO 40 nodos

En este caso la situación mejora en torno a un 5% para los casos con radio de cobertura pequeño, donde la probabilidad de aislamiento para estos casos pasa a ser del 90%. Para radios grandes desciende ligeramente esta probabilidad aunque casi se podría decir que se mantiene la misma probabilidad del caso anterior.

RPGM AISLAMIENTO

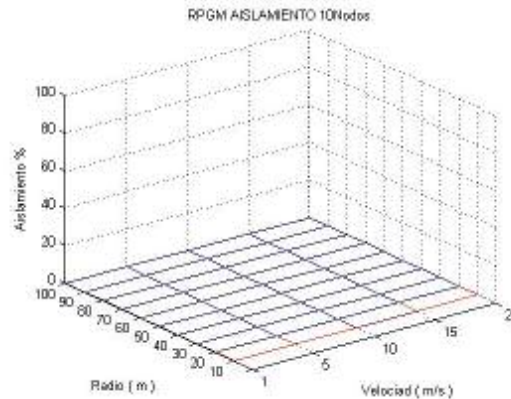


Figura 4.4 Gráfica aislamiento RPGM para todas las densidades

RPGM AISLAMIENTO 10, 20, 30, 40 nodos

Ya hemos visto en ocasiones anteriores como RPGM sigue un modelo donde los nodos se agrupan en comunidades y cambian de grupo eventualmente. Esto define en gran parte la probabilidad de aislamiento ya que si un nodo va en grupo y tiene un radio de cobertura razonable debe llegar casi constantemente a algún miembro del grupo y eso implica que un nodo no esté aislado prácticamente nunca. Concretamente en este caso solo se produce aislamiento para 10 metros de radio donde posiblemente durante un cambio de grupo algún nodo ha permanecido algunos instantes aislado, o quizás simplemente en un momento dado un nodo no alcanzó ni siquiera a los de su propio grupo por estar dispersados a más de diez metros entre ellos. La probabilidad de aislamiento para todas las densidades oscila entre el 0,2% y el 0,6%. Con esto podemos corroborar que el comportamiento del modelo RPGM coincide con lo esperado.

4.2. Probabilidad de conectividad extremo a extremo

A continuación se muestra la representación gráfica correspondiente a los resultados obtenidos para cada caso concreto.

MG CONECTIVIDAD

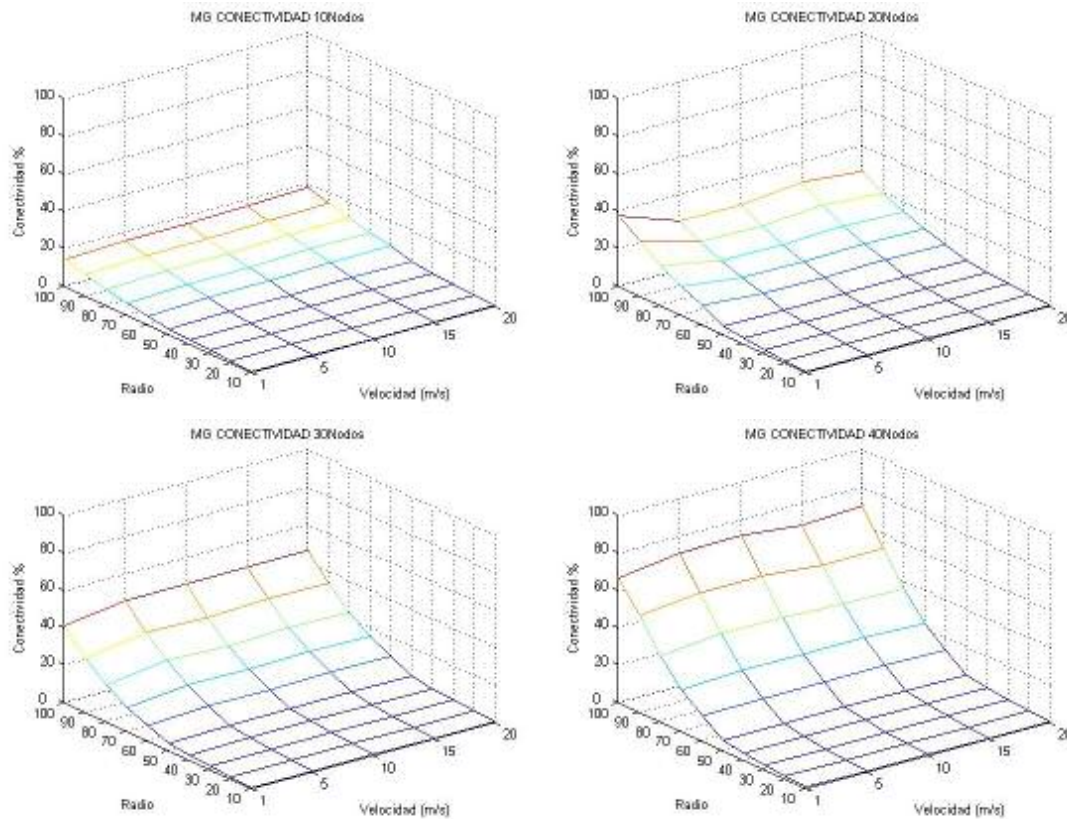


Figura 4.5 Gráficas conectividad MG

MG CONECTIVIDAD 10 nodos

En esta gráfica se observa como para un escenario con densidad de población pequeña la conectividad aumenta proporcionalmente con el radio de cobertura tal y como estaba previsto. Además se puede considerar casi independiente de la velocidad a la que se mueven los nodos y alcanza un valor máximo de casi el 20% para un radio de cobertura de 100metros.

MG CONECTIVIDAD 20 nodos

En esta gráfica se observa como doblando la densidad de población respecto al escenario anterior la conectividad aumenta con el radio de cobertura tal y como estaba previsto. Los resultados corroboran así que la velocidad de los nodos es independiente a la conectividad extremo a extremo (excepto para $v = 1\text{m/s}$, ver punto “5.1”) que tienen los nodos. En este caso podemos observar que la conectividad máxima estaría en torno al 30%, lo cual supone un aumento mínimo respecto al caso anterior.

MG CONECTIVIDAD 30 nodos

Si volvemos a aumentar la densidad de nodos en un factor del 25% de densidad la conectividad aumenta también casi proporcionalmente con el radio de cobertura tal y como hemos visto en cada caso, y como se ha comentado anteriormente la velocidad influye sobre todo para el caso de 1m/s. En este caso los nodos están lejos unos de los otros durante más tiempo y no da tiempo a que se produzcan tantos recorridos como a velocidades superiores (menor conectividad a velocidad baja).

En este caso podemos observar que la conectividad máxima estaría en torno al 40%, lo cual supone un aumento que sigue la misma proporción que los casos anteriores.

MG CONECTIVIDAD 40 nodos

Con la máxima densidad considerada, es decir 40 nodos, la conectividad extremo a extremo de los nodos aumenta proporcionalmente como ya hemos ido viendo en los casos anteriores, pero en este caso se puede apreciar el efecto exponencial que se dibuja en la gráfica ya que aumentando nuevamente en un factor 25% los nodos, la conectividad crece más que en los casos anteriores.

En este caso podemos observar que la conectividad máxima habría aumentado entre un 25% y un 30% y esto supone un aumento que difiere con la proporción que se seguía.

RW CONECTIVIDAD

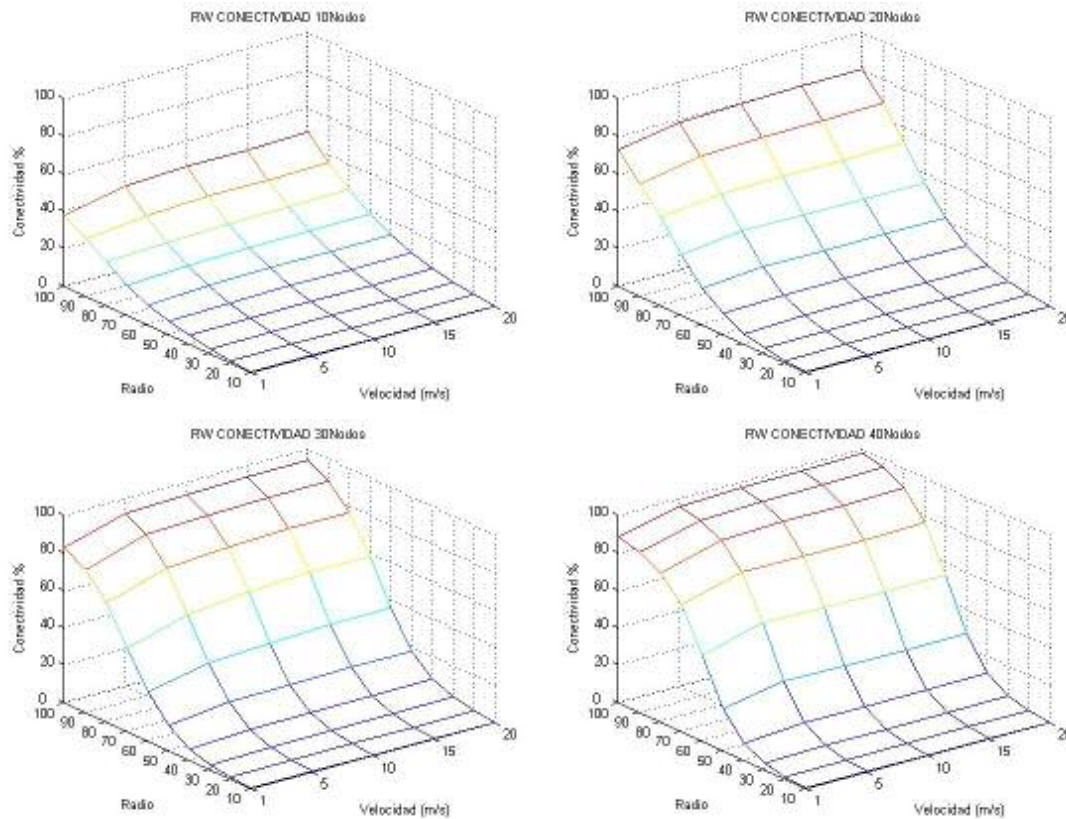


Figura 4.6 Gráficas conectividad RW

RW CONECTIVIDAD 10 nodos

En RW los nodos se mueven libremente por el escenario siguiendo caminos en forma de línea recta. En este caso se simula con una densidad de 10 nodos y vemos como la conectividad máxima alcanza el 47%. La conectividad aumenta proporcionalmente con el radio de cobertura y la velocidad se puede considerar como en los casos anteriores un aspecto que no afecta en lo referente a conectividad.

RW CONECTIVIDAD 20 nodos

Duplicando la densidad respecto al caso anterior la curva se levanta hasta el 80% de conectividad. Esto demuestra que un aumento en la densidad de nodos del escenario aumenta la probabilidad de que todos los nodos se vean, además estamos muy cerca de alcanzar la densidad óptima para RW, y este es un parámetro que no se ha alcanzado para los demás escenarios, con lo cual se deduce que en aspectos de conectividad RW es el modelo más eficiente.

RW CONECTIVIDAD 30 nodos

Con una densidad de 30 nodos y 100 metros de radio se alcanza el 94% de conectividad máxima, casi podríamos hablar de densidad óptima para RW. Ahora la curva se desdobra en la parte superior disminuyendo la proporción de conectividad para radios elevados, es decir la conectividad crece más de 60 a 70 metros que de 90 a 100 metros. Este comportamiento indica que aumentar el radio de cobertura a partir de 90 metros no mejora tanto las cosas como para casos con radio de cobertura inferior y esto es porque aumentando el radio los nodos no van a llegar a muchos más vecinos porque ya llegan a casi todos. Esta peculiaridad se aprecia mejor en el caso para 40 nodos.

RW CONECTIVIDAD 40 nodos

Ahora sí que podemos afirmar que hemos llegado a la densidad óptima con un 98% de conectividad. Efectivamente comprobamos como se cumplen las hipótesis comentadas en el caso de los 30 nodos, vemos como con radios de cobertura elevados la conectividad aumenta entre un 3% y un 6% del total, en cambio para radios de cobertura medios se producen crecidas de hasta un 25%. Esta tendencia permite prever que con un nuevo aumento de densidad necesitaríamos menos radio de cobertura para alcanzar una conectividad elevada.

RPGM CONECTIVIDAD

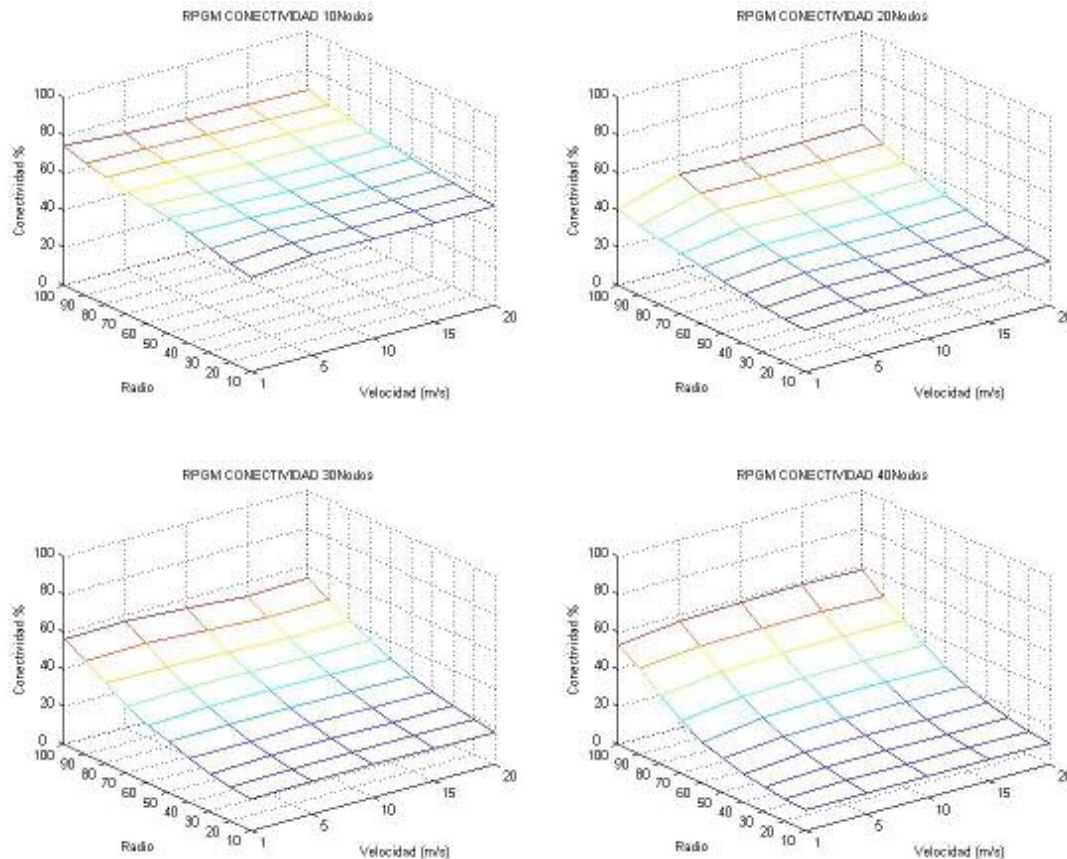


Figura 4.7 Gráficas conectividad RPGM

RPGM CONECTIVIDAD 10 nodos

Como se explica en un apartado anterior RPGM se caracteriza por la formación de grupos de nodos que pueden cambiar de grupo en un momento dado, teniendo en cuenta esto y sabiendo que con 10 nodos se pueden formar hasta 2 grupos (ver parámetros), interpretamos la gráfica como un escenario en que se forman dos grupos que durante la simulación se puede unificar en uno, e incluso volverse a romper en dos. Esto explica que con radios de cobertura elevados exista la posibilidad de no tener conectividad total, ya que en caso de haber dos grupos pueden no verse entre ellos. La conectividad máxima ronda el 78% y la mínima el 50%. Esta diferencia viene dada por la dispersión en un mismo grupo, es decir que un nodo no llegue a otro nodo de su mismo grupo.

La pendiente de la gráfica explica como los nodos mantienen conectividad durante más instantes cuanto más radio de cobertura tienen ya que con mayor radio de cobertura más tardan en perder la conectividad un grupo de otro porque tienen que alejarse más.

RPGM CONECTIVIDAD 20 nodos

En este caso tenemos 20 nodos en el escenario, y con esto se pueden crear hasta 4 grupos de nodos. Se puede apreciar como la conectividad baja precipitadamente respecto al caso anterior, ya que antes siempre se alcanzaba como mínimo a la mayoría de integrantes de un grupo y eso aseguraba un 50% de conectividad constantemente. Ahora se pueden crear hasta 4 grupos y eso asegura una conectividad mínima en torno al 25% por esta razón. Se supone que como mínimo todos llegan a casi todos los nodos de su grupo.

RPGM CONECTIVIDAD 30 nodos

En el caso para 30 nodos la tendencia que se aprecia sigue la misma lógica comentada en el caso de los 20 nodos, ahora se pueden crear hasta 6 grupos y eso hace que la conectividad mínima vuelva a bajar. En cuanto a conectividad máxima se aprecia un pequeño ascenso ya que un aumento en el número de nodos implica que puedan crearse más grupos y con este pequeño aumento de densidad dentro de las mismas dimensiones es más probable que los nodos conecten con nodos de otros grupos.

RPGM CONECTIVIDAD 40 nodos

Vemos como la tendencia vista hasta ahora sigue la misma dinámica en cuanto a conectividad máxima y mínima. Ahora la máxima alcanza el 58% y la mínima el 10%.

Se pueden crear hasta 8 grupos con 5 nodos cada grupo, esto significa que $5/40 = 0,125$, el 12,5% es el porcentaje de conectividad teórico que se le asegura a cualquier nodo, en la simulación se verifica que el valor de conectividad mínima es del 10,5%, un poco inferior debido a que con radios pequeños se da algún caso donde un nodo no llega a otro de su mismo grupo.

4.3. Número de saltos extremo a extremo

MG NUMERO DE SALTOS

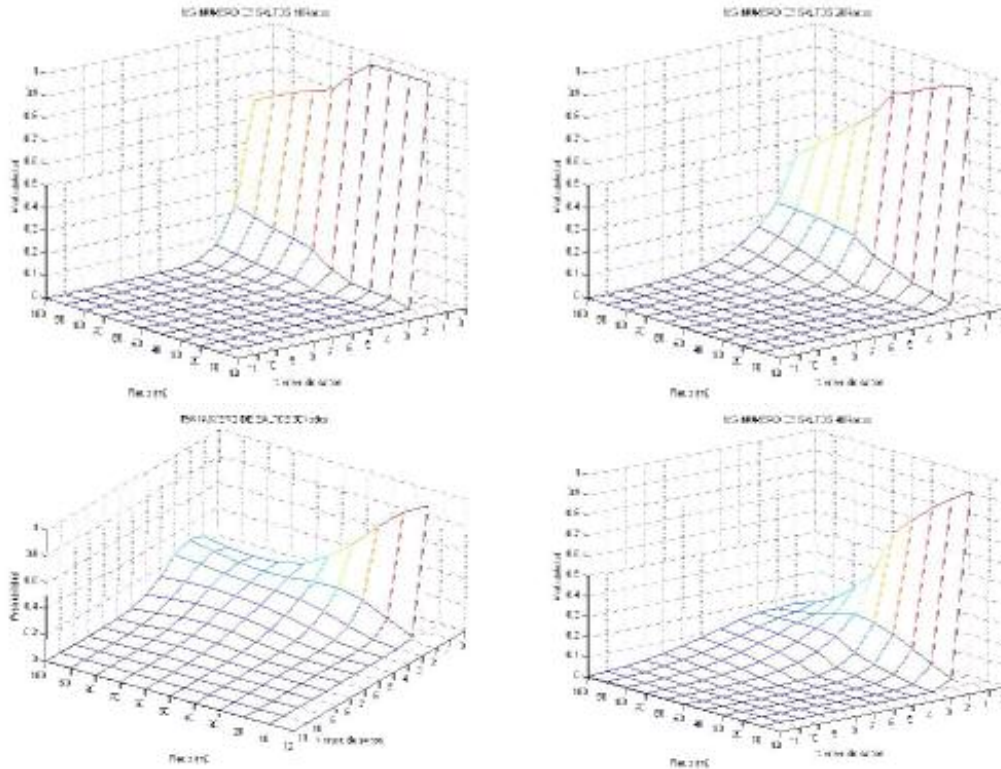


Figura 4.8 Gráficas número de saltos MG

MG NUMERO DE SALTOS 10 nodos

En esta gráfica se representa la PDF (función de probabilidad) del número de saltos para el mismo escenario MG que se ha visto en casos anteriores. Se puede observar como la curvatura de la gráfica decrece con el aumento del radio de cobertura. Hasta los 40 metros de cobertura la gráfica permanece inalterable en el 99% de probabilidad para caminos de 1 salto. Una vez se alcanzan los 50 metros empieza a aumentar la probabilidad de atravesar caminos de más saltos, a su vez la probabilidad de atravesar caminos de 1 salto va disminuyendo progresivamente. Esto coincide con el fenómeno comentado anteriormente en MG AISLAMIENTO 10Nodos, donde a 50 metros de cobertura se producía un descenso en la probabilidad de aislamiento más notable que para otros radios, esto se relaciona con el número medio de saltos en la medida en que cuando un nodo sobrepasa las dimensiones de un “edificio” con su radio de cobertura es capaz de llegar a nodos que con cualquier radio inferior resulta inalcanzable, por tanto es lógico que el número de saltos empiece a aumentar en este punto donde un

nodo ya es capaz de alcanzar a los nodos de un camino adyacente dentro de la maya que representa MG.

MG NUMERO DE SALTOS 20 nodos

Para este caso vemos como un aumento en la densidad de nodos en el escenario supone la rotura de la permanencia en el 99% de caminos de 1 salto para radios hasta 40 metros. Ahora la máxima probabilidad para caminos de 1 salto es del 96% con el radio más pequeño posible, y por poco que aumente este radio, esta probabilidad sigue descendiendo progresivamente. A pesar de esto se continua apreciando un descenso más notable a partir de los 50 metros tal y como ocurría para el caso anterior donde quedado justificado este fenómeno. En cuanto a densidad de nodos se aprecia también como duplicando el número de nodos se duplica también el número de saltos que puede alcanzar un camino.

MG NUMERO DE SALTOS 30 nodos

En esta gráfica queda demostrada la importancia que tiene la densidad de nodos con respecto al número de saltos que puede tener un camino. En el peor de los casos, cuando tenemos el radio de cobertura más pequeño posible los caminos de un salto siguen marcando la diferencia respecto a los demás con un 96% de probabilidad, pero en cuanto a como evoluciona su comportamiento aumentando el radio podemos decir que existe una proporcionalidad directa entre dicho aumento y el descenso de la probabilidad para caminos de pocos saltos, es decir conforme se aumenta el radio descenden los caminos de 1 salto y se generan caminos con más saltos hasta llegar a generarse caminos de 20 saltos que representa el 75% del camino más largo posible que sería de 30 saltos. Otro aspecto notorio en este caso es que produce una convergencia entre las probabilidades de los caminos de 1 y 2 saltos con el aumento del radio de cobertura tal que la diferencia entre las probabilidades de ambos caminos va acortando distancias hasta que llegados al radio máximo la diferencia es de solo un 5%.

MG NUMERO DE SALTOS 40 nodos

En este último caso se produce una peculiaridad que no habíamos visto hasta ahora, y es que la línea que marca los caminos de 2 saltos tiene un punto de inflexión a los 60 metros pasando de un incremento constante a un decremento también constante que llega a igualarse en valores de probabilidad con los caminos de 1, 3 y casi 4 saltos quedando todos con una probabilidad equivalente del 15%. Esto no significa que cada vez haya

menos caminos de 1 salto sino que el crecimiento en el número de caminos de 2,3 y 4 reduce la probabilidad de que un camino tenga 1 salto

RW NÚMERO DE SALTOS

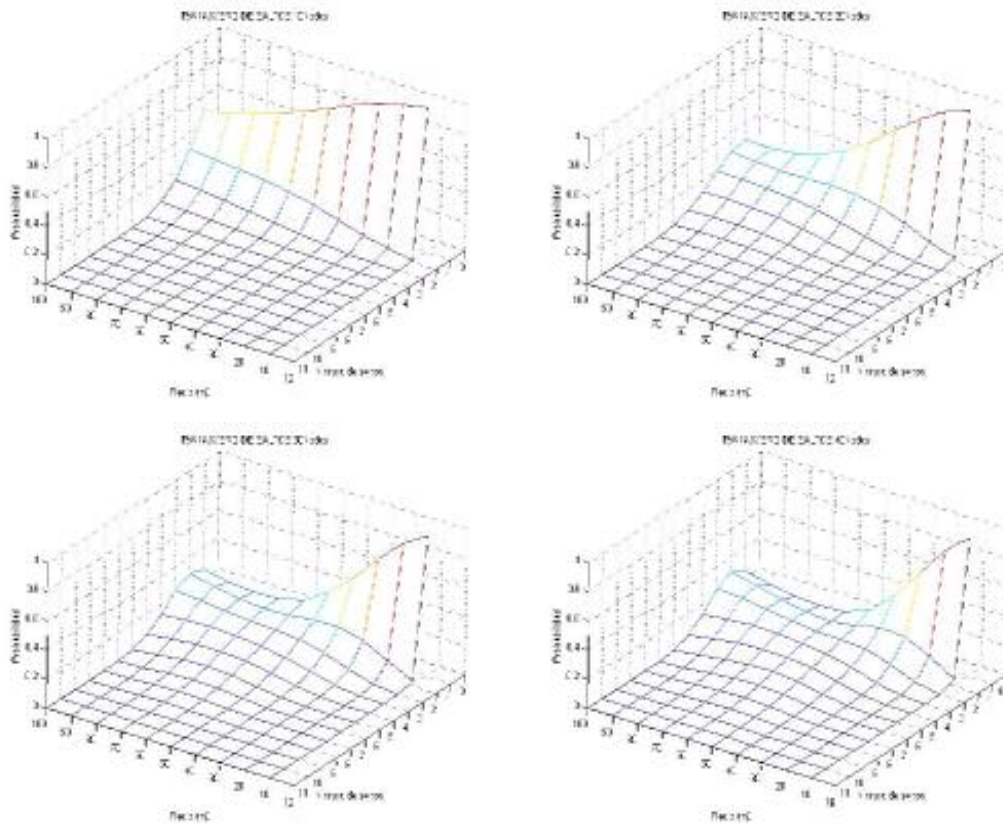


Figura 4.9 Gráficas número de saltos RW

RW NÚMERO DE SALTOS 10 nodos

Como en otras ocasiones se puede apreciar una ligera similitud entre esta gráfica y las comentadas para MG, con la diferencia que en este caso la libertad de movimiento de los nodos queda reflejada en la gráfica plasmándose en forma de evolución menos escalonada y con cambios más suavizados que en MG. Esto se debe a que no tenemos restricciones en las trayectorias que produzcan repentinamente la aparición de nuevos caminos. Es lógico que para el menor de los radios tengamos una probabilidad del 99% para caminos de 1 salto igual que en MG pero a diferencia que antes no hay que esperar a superar los 40 metros de radio para que descienda esta probabilidad. Para radios grandes se puede apreciar como se inicia una especie de convergencia entre los puntos de la gráfica correspondientes a los caminos de 1 y 2 saltos.

RW NÚMERO DE SALTOS 20 nodos

Con una densidad de 20 nodos vemos de nuevo como la libertad de movimiento permite que la gráfica evolucione más con densidades inferiores al caso MG, y un ejemplo de esto es la similitud entre esta gráfica y la que se ha visto en MG 20 nodos. Cabe destacar la proporción tan directa que se aprecia entre el decremento para caminos de 1 salto y el aumento para caminos de 2 o más saltos. Esto es debido a que los caminos de un salto son mayoría cuando tenemos radios pequeños ya que casi todos los nodos a los que llegamos son vecinos muy cercanos, en cambio aumentando el radio aparecen caminos de más saltos, y aunque continúen existiendo los mismos caminos de 1 salto o incluso más, ahora la mayor proporción de caminos son de 2 o más saltos.

RW NÚMERO DE SALTOS 30 nodos

Llegados a este punto es lógico deducir que si aumentásemos el radio constantemente llegaría un punto en que todos los caminos serían de un salto porque todos los nodos llegarían a sus vecinos directamente. Ahora bien hasta que esto se produce existe una evolución que empieza a apreciarse en esta gráfica. Vemos como el dibujo pasa por un punto de inflexión a los 70 metros en el que los caminos de 1 y 2 saltos pasan de un decremento constante a un nuevo crecimiento. Como ya hemos dicho, aumentando el radio conseguiríamos que continuaran creciendo los caminos de pocos saltos hasta que los caminos de un salto superasen en gran medida a los caminos de más saltos, pero ¿qué pasa si continuamos aumentando la densidad de nodos? Veamos el caso con 40 nodos de densidad.

RW NÚMERO DE SALTOS 40 nodos

En este caso podemos dar respuesta a como evoluciona la gráfica añadiendo más nodos, concretamente para una inserción de 10 nodos más. Pues bien, el efecto de esto es el aumento de la pendiente inicial cayendo cada vez más bruscamente y más próxima a radios pequeños. Esto significa que aumentando la densidad de nodos conseguiremos aproximar el punto de inflexión (en este caso a 50 metros de radio) a radios cada vez más pequeños consiguiendo así que se inicie el nuevo crecimiento de caminos cortos mucho antes, de forma que el punto de convergencia final donde todos los caminos fueran de 1 salto requeriría un radio de cobertura menor que con densidades menores. Concretando en este ejemplo se obtiene un 92% de caminos de entre 1 y 4 saltos con un radio de 100 metros.

RPGM NUMERO DE SALTOS

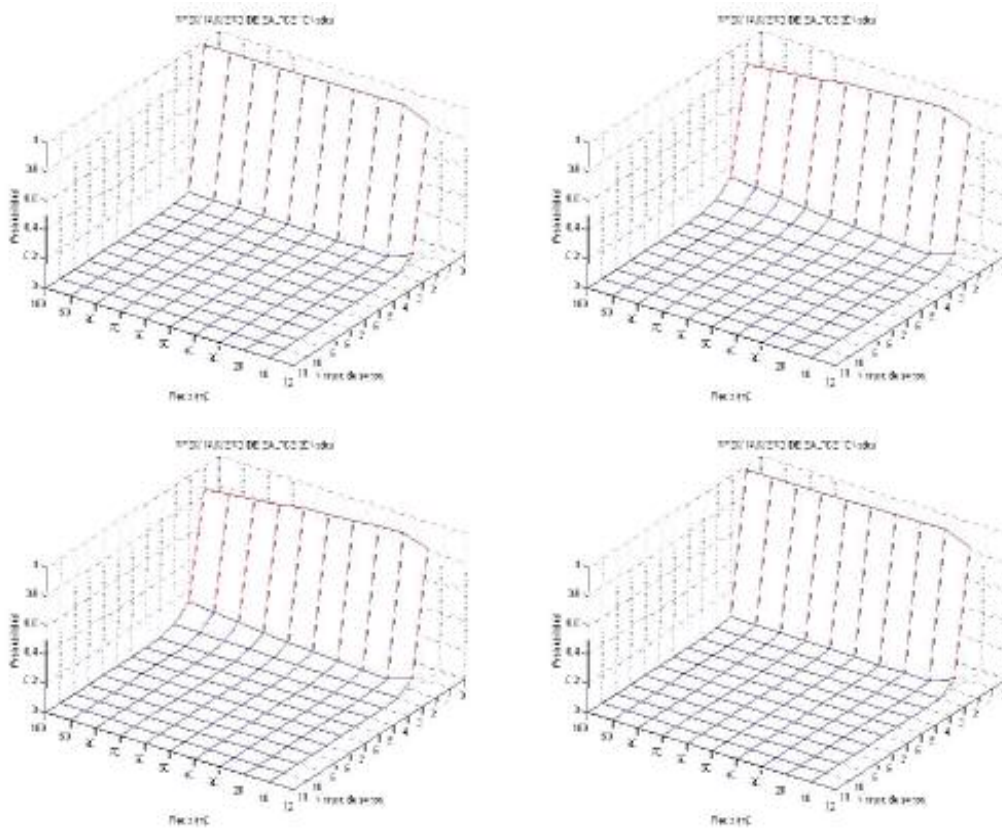


Figura 4.10 Gráficas número de saltos RPGM

RPGM NÚMERO DE SALTOS 10 nodos

Para RPGM los nodos van en grupos y con 10 nodos se generan 2 grupos de promedio. Esto representa 2 puntos en un escenario donde utilizando MG o RW representaría un mínimo de 10, con lo cual nos encontramos con una densidad real equivalente a un 20% de lo que teníamos hasta ahora. Lógicamente por este motivo lo más probable es que durante casi toda la simulación lleguemos únicamente a los integrantes de nuestro grupo, y esto queda reflejado en la gráfica con el alto porcentaje de caminos con 1 salto correspondiente al coste o distancia que tiene un nodo con los nodos de su grupo. Se aprecia a simple vista como para el caso en que el radio de cobertura es mínimo existe un pequeño porcentaje de caminos con 2 saltos y esto es debido a la dispersión que existe dentro de un mismo grupo, donde los nodos pueden necesitar atravesar más de un nodo por tener un radio inferior a la distancia que hay de un extremo al otro del grupo.

RPGM NÚMERO DE SALTOS 20, 30 y 40 nodos

La evolución de la gráfica se comporta de forma muy similar al de los casos anteriores con la excepción de que sufre una evolución más lenta. Lógicamente esto se debe al gran parecido con RW pero con diferencias en cuanto a densidad real respecto a los demás casos ya que en RW tendríamos 20 puntos moviéndose por el escenario y en este caso tenemos 4 grupos o “puntos” reales.

Con 30 nodos la evolución sigue el mismo patrón visto hasta ahora.

En el caso de 40 nodos la densidad de nodos es casi equivalente a la densidad que teníamos en RW NUMERO MEDIO DE SALTOS 10 Nodos, ahora tenemos un promedio de 8 grupos y en el caso RW 10 nodos, o dicho de otra forma, 8 y 10 puntos del grafo. Esta equivalencia queda reflejada en la gráfica en cuanto a similitudes en los resultados. Vemos como la evolución del dibujo es la misma excepto en el número de caminos de dos saltos con radio mínimo, que como se ha comentado anteriormente es debido a la dispersión que existe dentro de un mismo grupo, donde los nodos pueden necesitar atravesar más de un nodo por tener un radio inferior a la distancia que hay de un extremo al otro del grupo.

4.4. Duración media de un camino sin cortes

MG TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES

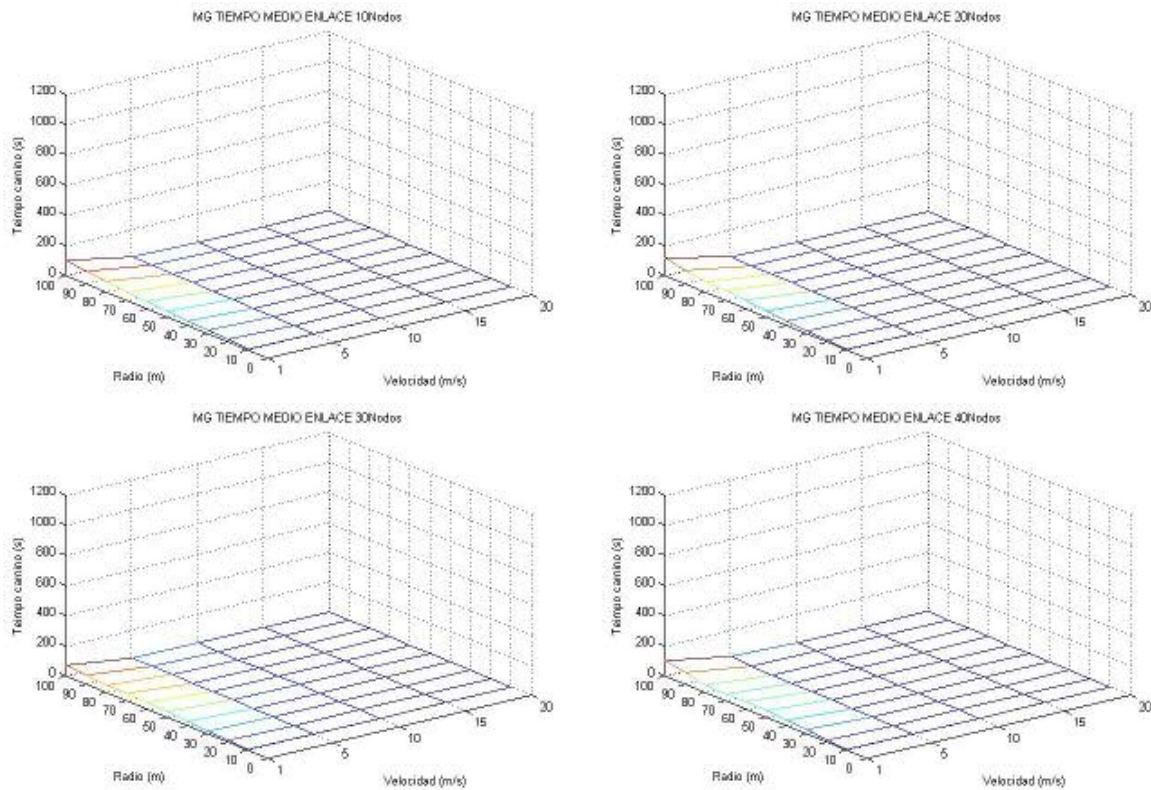


Figura 4.11 Gráficas tiempo medio de camino sin cortes MG

MG TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES 10, 20, 30, 40 nodos

Para el caso MG el tiempo medio camino sin cortes se ve afectado por la velocidad y el radio de cobertura pero no tanto por la densidad de nodos. Solo en dos de los cuatro casos se supera escasamente los 100 segundos como tiempo medio de camino sin cortes. Realmente esto no significa que el número de nodos sea indiferente con respecto al tiempo medio de enlace de un camino, pero si que las densidades escogidas no han sido suficientes para asegurar caminos sin cortes durante un tiempo razonablemente alto. Seguramente lo más adecuado para este caso sería aumentar el radio de cobertura de los nodos y no la densidad de los mismos.

RW TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES

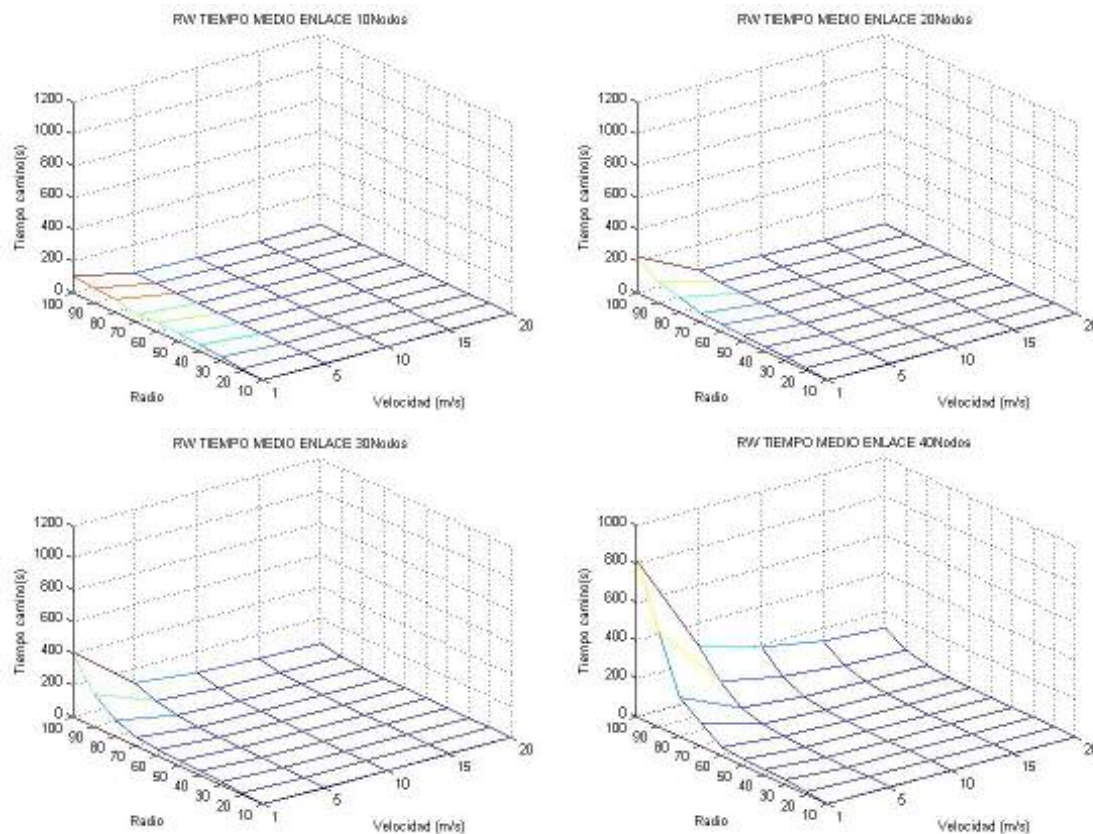


Figura 4.12 Gráficas tiempo medio de camino sin cortes RW

RW TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES 10 nodos

Esta primera gráfica es muy similar a las analizadas anteriormente para MG, los valores casi coinciden con lo analizado anteriormente pero como veremos en las siguientes gráficas la evolución que genera el aumento de nodos para este patrón de movilidad es totalmente diferente.

RW TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES 20 nodos

Con una densidad el doble que la anterior únicamente se generan cambios a velocidad mínima, sin embargo para cualquier velocidad superior no se produce mejora alguna. Vemos como al duplicar la densidad de nodos, se duplica el tiempo medio de camino sin cortes para radios elevados.

RW TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES 30 y 40 nodos

En este caso se vuelve a cumplir la dinámica comentada en cuanto a proporcionalidad entre número de nodos y tiempo medio de enlace, ahora aumentando nuevamente en 10 el número de nodos se vuelve a duplicar el tiempo medio de enlace alcanzando los 400 segundos de máxima a velocidad mínima y radio máximo. A diferencia que el caso anterior ahora se empieza a apreciar mejoras más notables también a velocidades superiores aunque cuanto más aumentamos la velocidad menos tiempo medio de camino sin cortes se obtiene.

Finalmente vemos como para 40 nodos la evolución del gráfico se mantiene en la misma dinámica aumentando de nuevo el tiempo de camino sin cortes hasta llegar a doblarse alcanzando los 800 segundos para velocidad mínima y radio máximo.

RPGM TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES

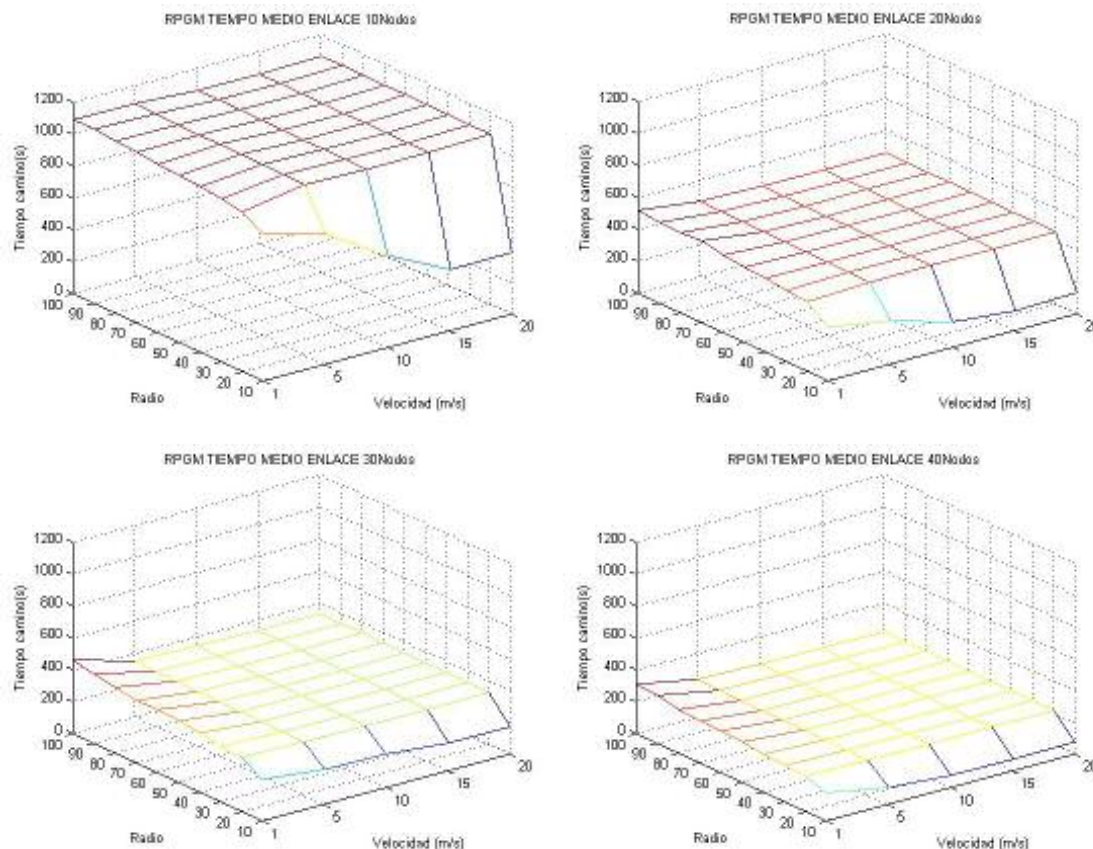


Figura 4.13 Gráficas tiempo medio de camino sin cortes RPGM

RPGM TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES 10 nodos

En el caso para 10 nodos sabemos que se crea una media de dos grupos. Teniendo en cuenta este dato es fácil entender la gráfica ya que solamente llegando a todo nuestro grupo ya llegamos a una media del 50% del total de nodos. Otro efecto notable en la gráfica es como cae el tiempo medio de enlace cuando descende el radio de cobertura hasta el mínimo, esto ocurre porque el radio es tan pequeño que algunos nodos pierden periódicamente la conectividad con vecinos de su propio grupo, esto se puede comprobar observando un parámetro de RPGM que aparece en la introducción del capítulo 4, donde se nombra maxDist que determina la distancia máxima que puede haber entre nodos del mismo grupo.

RPGM TIEMPO MEDIO DE CAMINO SIN CORTES 20, 30, 40 nodos

Doblando el número de nodos la gráfica sufre una importante caída donde el tiempo medio de enlace pasa a ser prácticamente la mitad que el de antes. Esto sigue la misma lógica que antes ya que ahora el número medio de grupos que se forman son 4, que es el doble de los grupos que teníamos antes, y esto dispersa más a los nodos de forma que el tiempo medio de camino sin cortes de todos contra todos descende estrepitosamente y con ello el tiempo medio de un camino cualquiera que se calcula en base a todos.

Con 30 nodos se genera una media de 6 grupos de nodos. Ahora la velocidad tiene una importancia que hasta el momento no la tenía, concretamente para 1 m/s el tiempo medio de enlace se mantiene superior a los tiempos correspondientes a cualquier otra velocidad. Esto se debe a que a menor velocidad los caminos que se generan tardan más tiempo en romperse ya que los nodos tardan más en distanciarse, como contrapartida el número de caminos que se generaran durante toda la simulación será inferior al que se genere para velocidades superiores.

Por último tenemos el caso para 40 nodos donde se genera una media de 8 grupos. La reacción del gráfico respecto a este aumento en el número de nodos indica que el tiempo medio de enlace queda afectado nuevamente en forma de descenso, alcanzando su cota máxima a velocidad mínima debido a lo comentado en el caso anterior.

Por la evolución que se aprecia observando las cuatro gráficas, un aumento continuo de nodos supondría un aumento en el tiempo medio de enlace para velocidades pequeñas sobre todo con radios grandes, algo similar a lo

que ocurre en RW pero con un descenso para radios pequeños que cada vez se iría reduciendo más.

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

5.1. Conclusiones

En este proyecto se ha pretendido realizar un estudio por simulación sobre la conectividad y topología de una red Ad-hoc en función de determinados parámetros (tipo de patrón de movimiento a seguir, densidad de nodos dentro del escenario, velocidad de los mismos y radio de cobertura). Los resultados de estas simulaciones pueden ser de gran utilidad para el desarrollo de modelos analíticos tanto de parámetros de conectividad y topología como de otros parámetros de rendimiento como el throughput de la red.

En el proyecto se ha analizado la literatura existente y se ha optado por el desarrollo de una herramienta que permitiese obtener los valores de parámetros de interés como la probabilidad de nodo aislado, conectividad extremo a extremo, número de saltos de una ruta, etc. Se han considerado tres modelos de movilidad (MG, RW y RPGM); radios de transmisión entre 10 m y 100 m; densidades de 10, 20, 30 y 40 nodos en un mismo recinto y velocidades de 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s y 20 m/s.

Se ha comprobado que los parámetros de conectividad estudiados dependen en gran medida de las variables consideradas. Entre estas, cabe destacar la influencia del modelo de movilidad. En este sentido, se ha observado:

- El modelo RW distribuye los nodos de tal forma que da lugar a probabilidades de conectividad más elevadas para una misma densidad de nodos. Esto se debe a la libertad con la que se mueven los nodos, puesto que no hay restricciones de movimiento (como las que existen con MG) o la restricción de que los nodos se desplacen en grupo (como ocurre con RPGM).
- El modelo MG es menos sensible a la densidad de nodos que RW.
- En el caso de MG, el radio de transmisión influye en los resultados, debido a la geometría de la rejilla en la que se mueven los nodos. Es decir, cuando el radio de transmisión supera el ancho de cada *edificio*, existe una mayor conectividad en la red. Esto repercute en todos los parámetros de conectividad y topología que se han estudiado.

- El modelo RPGM constituye un caso muy particular, en el que el hecho de que los nodos se desplacen en grupo es determinante en cuanto a la conectividad que existe en la red. Los nodos suelen poder comunicarse con el resto de miembros de su grupo, pero es menos probable que existan caminos que incluyan a nodos de varios grupos. De hecho, cada grupo se mueve siguiendo el modelo RW, de forma que un escenario con RPGM equivale a un escenario con unos pocos nodos moviéndose con RW. Como ejemplo, se ha visto que, para ciertos parámetros, los resultados con RPGM para 40 nodos (8 grupos) son próximos al caso de RW con 10 nodos.

5.2. Lineas futuras

Debido a que las redes Ad-hoc auguran un futuro muy prometedor están siendo motivación de numerosas investigaciones y de constantes progresos donde las aplicaciones, dispositivos y protocolos sufren también la aparición de nuevos resultados como los presentados en este trabajo, que sin duda nos acercan un poco más a la implantación de este tipo de redes.

Algunas de las posibles líneas futuras de investigación que se desprenden de este trabajo son las siguientes:

- Evaluar más profundamente la sensibilidad de los modelos de movilidad a sus parámetros y su impacto tanto en los parámetros de conectividad y topología que se han evaluado.
- Introducir nuevos modelos de movilidad que consideren coordenadas X, Y, Z, es decir en 3D, y que tengan en cuenta la topología del terreno que no tiene por qué ser plano.
- Desarrollar modelos analíticos que permitan obtener la misma información que proporcionan las herramientas desarrolladas en este trabajo.
- Ver el efecto de los entornos considerados en protocolos de routing (p. ej.: AODV y OLSR) y protocolos de transporte.

Referencias

- [1] IETF MANET working group
<http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [2] On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network. Christian Bettstetter.
<http://www.lkn.ei.tum.de>
- [3] MobiHoc Poster: Topology Properties of Ad Hoc Networks with Random Waypoint Mobility.
Christian Bettstetter (Christian.Bettstetter@ei.tum.de)
- [4] Multilayer analysis of the influence of mobility models on TCP flows in AODV ad-hoc Carles Gomez, Xavier Marchador, Victor Gonzalez, Josep Paradells.
Wireless Networks Group, Entel Dept., Technical University of Catalonia (UPC), {carlesgo, xmatchador, vgonpa, eljpa}@entel.upc.edu
- [5] Scenario-based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks, Proceedings of ACM/IEEE MOBICOM'99, pp. 195-206, P.Johansson, T. Larsson, N. Hedman, B. Mielczarek, M. Degemark.
- [6] Web oficial de BonnMotion (A mobility scenario generation and analysis tool)
<http://web.informatik.uni-bonn.de/IV/Mitarbeiter/dewaal/BonnMotion/>
- [7] Algoritmo de vector distancia
http://es.wikipedia.org/wiki/Vector_de_distancias
- [8] Algoritmo de Dijkstra
http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_de_Dijkstra

Anexos

Duración media de cortes en un camino

MG TIEMPO MEDIO DE CORTE

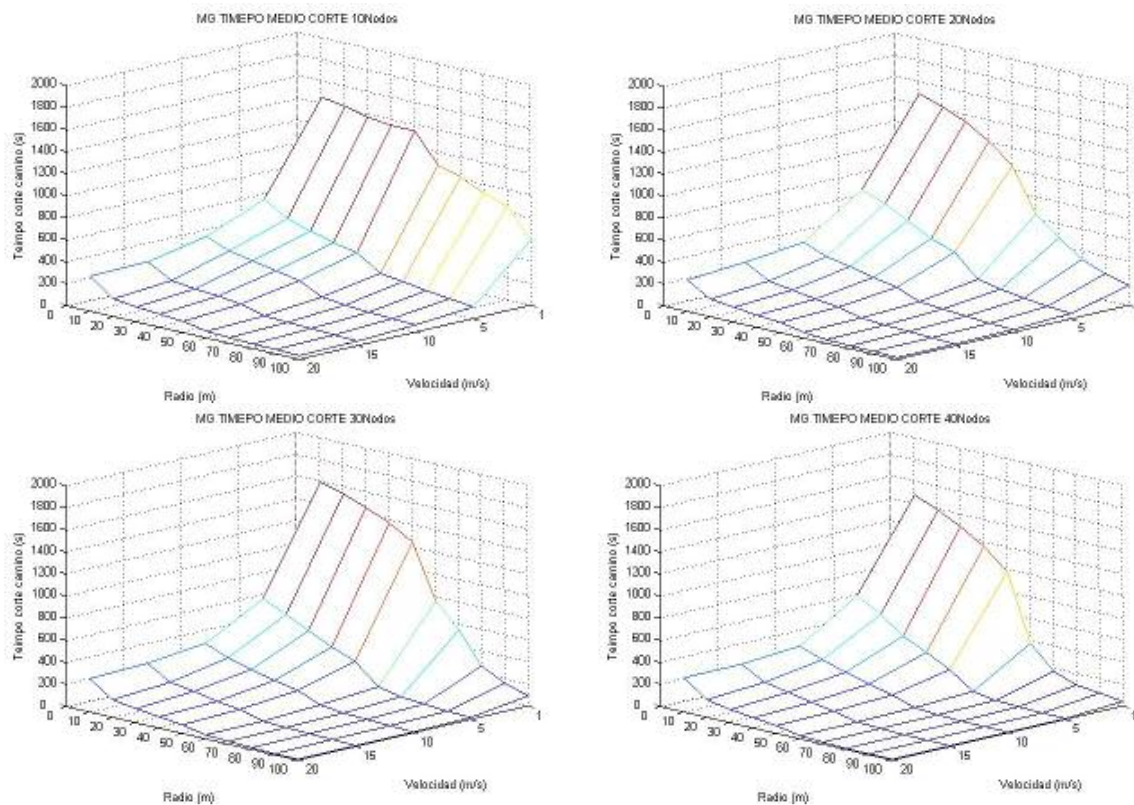


Figura 6.1 Gráficas tiempo medio de corte de un camino MG

MG TIEMPO MEDIO DE CORTE 10Nodos

Recordemos que el tiempo medio de corte no es el tiempo total en que un camino está cortado sino el tiempo total de corte dividido entre el número de restablecimientos. El gráfico muestra claramente como la velocidad afecta en mayor medida que la densidad de nodos en lo que respecta al tiempo medio de corte. A velocidades superiores se reduce en gran medida este tiempo hasta alcanzar valores casi óptimos. Además podemos apreciar nuevamente una peculiaridad ya comentada anteriormente, y es que al sobrepasar los 50 metros de radio se manifiesta una caída más notable que para los demás radios. Si recordamos lo que habíamos comentado esto se debe a que justo en este punto sobrepasamos en cobertura las dimensiones de los obstáculos de los que consta el escenario, los edificios.

MG TIEMPO MEDIO DE CORTE 20Nodos

Doblando el número de nodos observamos como se reduce el tiempo medio de corte sobre todo para velocidades pequeñas. Concretamente a velocidad mínima se observa una caída más marcada que antes donde con un radio de cobertura grande se alcanzan buenos resultados. Cabe destacar que a pesar de haber la misma diferencia entre todas las velocidades estudiadas se produce una mejora mucho mas destacada entre 1 m/s y 5 m/s que entre cualquier otro par de velocidades.

MG TIEMPO MEDIO DE CORTE 30Nodos

Con 30 nodos la gráfica evoluciona como se ha visto hasta ahora. Esta vez se obtienen resultados casi óptimos para todas las velocidades y un radio de 90 ó 100 metros.

MG TIEMPO MEDIO DE CORTE 40Nodos

Esta última gráfica es muy parecida a la anterior, pero llegados a este punto podemos asegurar que con un radio de 80,90 ó 100 metros y una densidad mínima de 40 nodos, el tiempo medio de corte de un camino es independiente a la velocidad de los nodos. Otra peculiaridad de esta gráfica es que vemos que aumentando la densidad de nodos crece la pendiente que se produce entre los 50 y 60 metros a 1 m/s, es decir cuando los nodos sobrepasan en cobertura al ancho de un edificio.

RW TIEMPO MEDIO DE CORTE

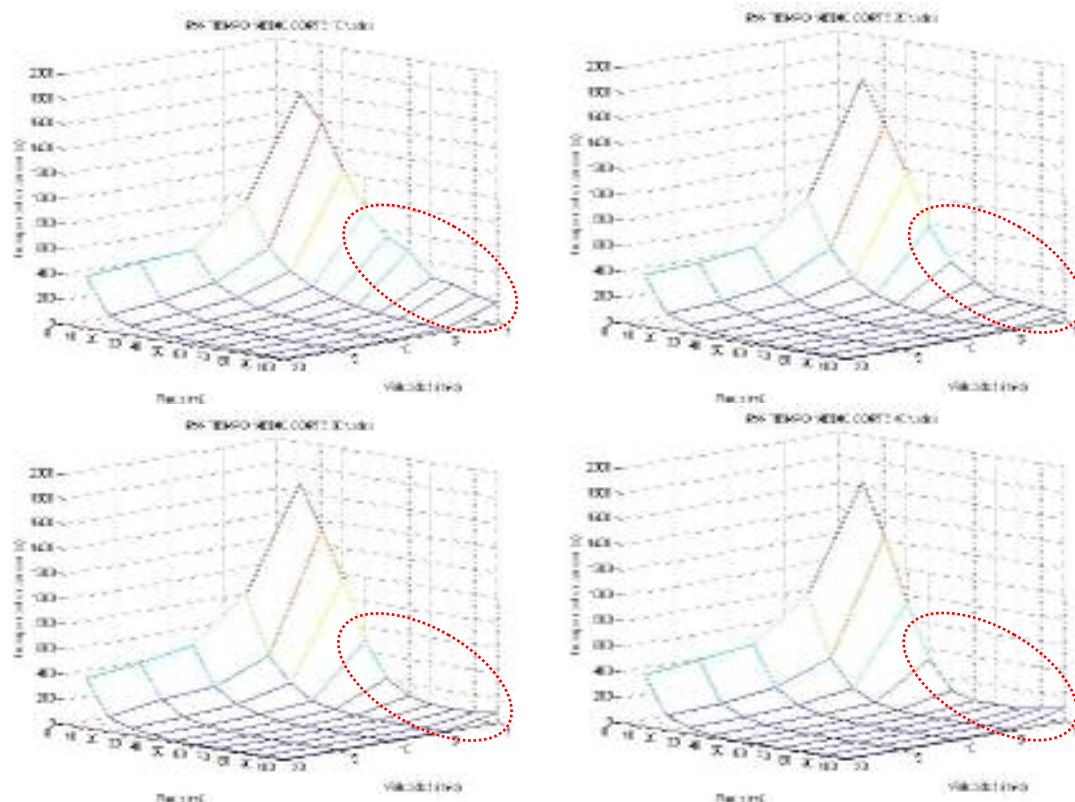


Figura 6.2 Gráficas tiempo medio de corte de un camino RW

RW TIEMPO MEDIO DE CORTE 10, 20, 30, 40 nodos

El caso RW guarda un cierto parecido al que hemos visto para MG, aunque en lo referente a tiempo máximo de corte medio en un camino es superior en este caso. Vemos como la velocidad es un factor a tener muy en cuenta a la hora de obtener un tiempo medio de corte pequeño, en cambio la densidad de nodos no juega un papel nada decisivo en cuanto a este parámetro, excepto a velocidad mínima, que es donde se observa como afecta el aumento en el número de nodos ya que con este aumento se requiere menos radio de cobertura para tener un tiempo medio de corte razonablemente pequeño. Si comparamos este escenario con MG podemos observar como en este caso el gráfico tiene más superficie plana con lo cual en general tiene mejores propiedades para soportar cortes de comunicación.

RPGM TIEMPO MEDIO DE CORTE

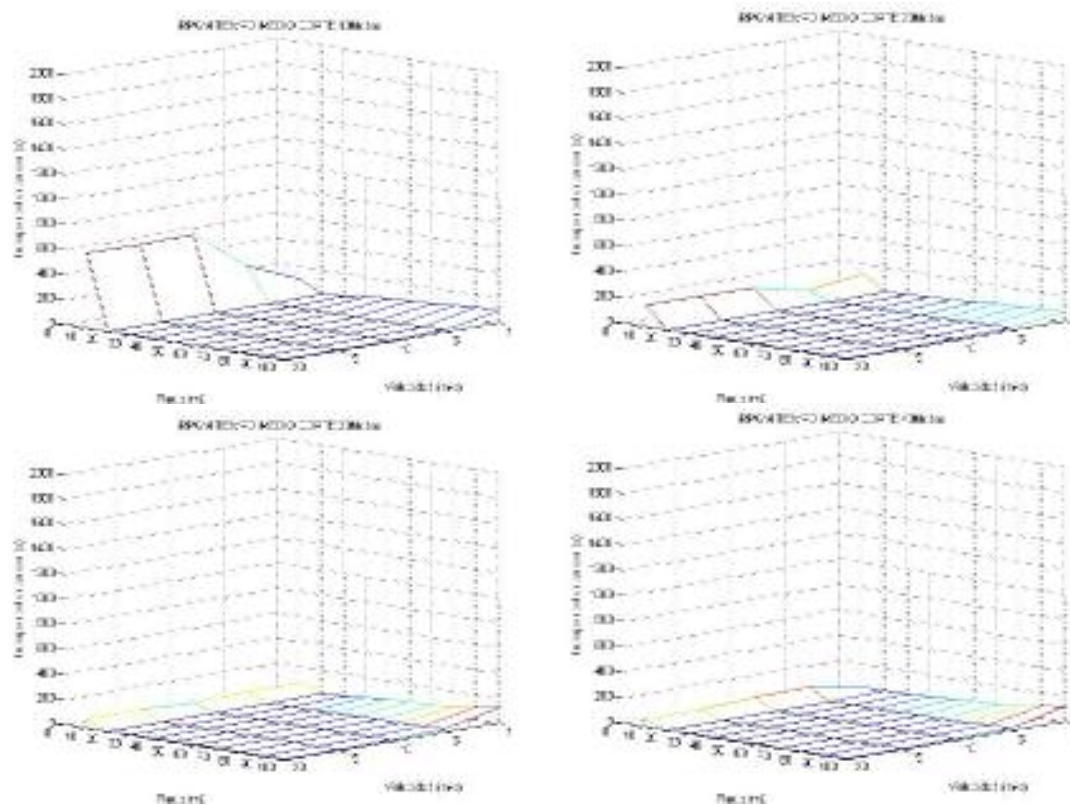


Figura 6.3 Gráficas tiempo medio de corte de un camino RPGM

RPGM TIEMPO MEDIO DE CORTE 10 nodos

Para el caso RPGM se aprecia un comportamiento bastante bueno en la mayoría de los casos debido a la formación de grupos. Concretamente para una densidad de 10 nodos vemos como la gráfica se mantiene plana excepto en momentos muy puntuales que son aquellos donde la velocidad o el radio de cobertura son bajos. Vemos como un radio de cobertura pequeño dispara el tiempo medio de corte de un camino, esto ocurre cuando los nodos de un grupo pierden la conectividad periódicamente con los vecinos de su mismo grupo, y como ya se ha comentado en otras ocasiones es debido a que la dispersión dentro de un mismo grupo puede ser superior al radio mínimo analizado, es decir 10 metros de cobertura.

RPGM TIEMPO MEDIO DE CORTE 20 nodos

Aumentando el número de nodos, el comportamiento de las comunicaciones a nivel de cortes mejora un poco, ahora para radios mínimos el tiempo medio de corte de un camino se reduce a menos de la mitad que antes. Este fenómeno viene dado por el aumento en el número de nodos ya que la proporción de nodos a los que no llegamos (de nuestro

grupo) respecto al total de nodos es inferior que antes y esto queda reflejado en forma de descenso en el tiempo medio de corte de un camino.

RPGM TIEMPO MEDIO DE CORTE 30 nodos

Con 30 nodos la proporcionalidad que adoptan los nodos que no alcanzamos con radios pequeños desciende en referencia al total. Vemos como la evolución de la gráfica se representa en forma de aplanamiento, excepto a velocidades pequeñas, donde por tratarse de una situación limitada en tiempo el número de veces que se producen reestablecimientos es inferior que para velocidades superiores y esto hace que los tiempos de corte sean superiores, digamos que la diferencia entre velocidades bajas y altas sería que para el primer caso los caminos y los cortes duran más y en el segundo caso se producen más cortes y restablecimientos en el mismo tiempo pero de menor duración.

RPGM TIEMPO MEDIO DE CORTE 40 nodos

Esta gráfica difiere muy poco de la anterior, en general lo que ocurre para 1 m/s es que al ser una velocidad casi de “a pie” el número de coincidencias en el cruce entre grupos es notablemente inferior al que se produce para velocidades superiores tal y como se demuestra en el ejemplo siguiente:

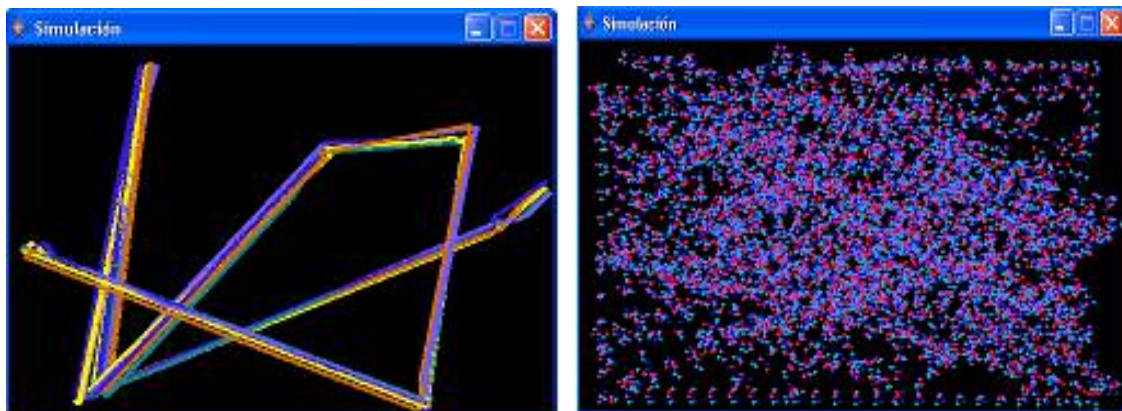


Figura 6.4 Representación gráfica correspondiente al movimiento de un grupo RPGM a mínima velocidad (izquierda) y máxima velocidad (derecha)

Ambos grafos representan el recorrido de un solo grupo de nodos para todo el periodo de simulación, donde el grafo de la derecha se mueve a 20 m/s y el de la izquierda a 1 m/s.

Vemos como el recorrido es muy superior cuando los nodos se mueven a 20 m/s y esto corrobora lo comentado al respecto. También podemos apreciar en el grafo como los nodos de un mismo grupo se desvían

ligeramente siguiendo un itinerario que dentro del grupo puede ser independiente al que siguen los demás nodos. En estos casos puede ocurrir que con radios pequeños no se alcancen algunos nodos vecinos.

Resultados numéricos de las simulaciones estudiadas en este trabajo.

Aislamiento

MG_AISL_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,95612194	0,95827086	0,96411794	0,95512244	0,96426787
20	0,90574713	0,91374313	0,92083958	0,90204898	0,91674163
30	0,86616692	0,86696652	0,87371314	0,84852574	0,86516742
40	0,82168916	0,81549225	0,82313843	0,78655672	0,80569715
50	0,77516242	0,75532234	0,76616692	0,72853573	0,73833083
60	0,64887556	0,61664168	0,63133433	0,57866067	0,5974013
70	0,55252374	0,53273363	0,54222889	0,49915042	0,51904048
80	0,46501749	0,45887056	0,47006497	0,42803598	0,44422789
90	0,38890555	0,3976012	0,40589705	0,37306347	0,37676162
100	0,31394303	0,34517741	0,34912544	0,31749125	0,32018991

MG_AISL_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,92646177	0,91051974	0,91134433	0,90662169	0,89955022
20	0,8374063	0,81821589	0,8191904	0,80582209	0,79972514
30	0,74290355	0,7183908	0,73078461	0,70102449	0,70229885
40	0,64805097	0,62618691	0,63590705	0,60482259	0,60984508
50	0,54165417	0,53423288	0,54572714	0,51569215	0,52118941
60	0,31876562	0,33870565	0,35957021	0,33603198	0,344003
70	0,21426787	0,25127436	0,26506747	0,24622689	0,25467266
80	0,14472764	0,18685657	0,19070465	0,18165917	0,1888056
90	0,10194903	0,13793103	0,13850575	0,13473263	0,13868066
100	0,07063968	0,10117441	0,0992004	0,10064968	0,1021989

MG_AISL_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,8671331	0,87134766	0,86521739	0,8637348	0,87218058
20	0,7398634	0,73315009	0,72876895	0,72585374	0,74149592
30	0,63115109	0,59986673	0,59955022	0,59711811	0,6141929
40	0,52258871	0,47829419	0,48390805	0,47967683	0,49406963
50	0,42577045	0,37359654	0,37867733	0,37826087	0,38690655
60	0,22275529	0,19425287	0,19748459	0,19503582	0,20084958
70	0,14404464	0,11960686	0,12791937	0,12578711	0,12665334
80	0,08755622	0,07406297	0,08319174	0,0811261	0,07989339
90	0,05717141	0,04695985	0,05498917	0,05545561	0,0494586
100	0,03861403	0,02795269	0,03456605	0,03599867	0,03001832

MG_AISL_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,80353573	0,83648176	0,81251874	0,81736632	0,82688656
20	0,62495002	0,6805972	0,64668916	0,64875062	0,65607196
30	0,47926037	0,52052724	0,49892554	0,50343578	0,50627186
40	0,37405047	0,38829335	0,38102199	0,37769865	0,38128436
50	0,27233883	0,27848576	0,28001	0,27451274	0,27777361
60	0,11229385	0,1080085	0,11313093	0,11068216	0,1134058
70	0,05724638	0,05858321	0,06095702	0,05904548	0,06130685
80	0,03184658	0,03222139	0,03435782	0,03284608	0,03334583
90	0,01989005	0,01891554	0,01999	0,01811594	0,017991
100	0,01181909	0,01103198	0,01156922	0,01024488	0,00989505

RW_AISL_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,97928964	0,9772	0,9734	0,97515	0,97551224
20	0,92356178	0,91705	0,9141	0,9129	0,91109445
30	0,8190095	0,81855	0,80985	0,8154	0,81449275
40	0,70370185	0,6984	0,6855	0,6963	0,69145427
50	0,57513757	0,5726	0,55825	0,56435	0,55762119
60	0,47183592	0,4627	0,44155	0,44805	0,44137931
70	0,39234617	0,36215	0,342	0,343	0,33793103
80	0,30230115	0,2745	0,2548	0,25885	0,25122439
90	0,24567284	0,2058	0,1895	0,1909	0,18675662
100	0,20185093	0,15315	0,1401	0,1395	0,13488256

RW_AISL_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,952775	0,948	0,94514757	0,94645	0,94685157
20	0,828325	0,812575	0,81228114	0,809375	0,81301849
30	0,6749	0,634725	0,63491746	0,633925	0,63350825
40	0,524975	0,465025	0,46453227	0,462275	0,46156922
50	0,37395	0,321175	0,32026013	0,31565	0,31256872
60	0,278525	0,213	0,21423212	0,20825	0,20387306
70	0,213625	0,145025	0,14287144	0,135325	0,13250875
80	0,163925	0,1011	0,09532266	0,0877	0,08490755
90	0,133875	0,069975	0,06363182	0,05625	0,05522239
100	0,110425	0,048	0,04269635	0,036025	0,0336082

RW_AISL_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,94386667	0,9318	0,92493333	0,92588333	0,92422122
20	0,78486667	0,74976667	0,74131667	0,73825	0,73624854
30	0,58263333	0,5327	0,52181667	0,515	0,51370981
40	0,38956667	0,34686667	0,33151667	0,3246	0,32098951
50	0,25518333	0,21311667	0,20198333	0,19341667	0,19030485
60	0,1754	0,13013333	0,11941667	0,11201667	0,10969515
70	0,1329	0,07961667	0,07185	0,067	0,06303515
80	0,1052	0,05045	0,04336667	0,0398	0,03644844
90	0,0859	0,03201667	0,02663333	0,02445	0,02045644
100	0,07401667	0,02256667	0,0177	0,01485	0,01132767

RW_AISL_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,906525	0,8990125	0,8995625	0,898925	0,89638931
20	0,68965	0,6611375	0,6627125	0,659425	0,65787106
30	0,43805	0,4089375	0,4144875	0,4081875	0,40589705
40	0,2656375	0,227325	0,232125	0,226275	0,22255122
50	0,174075	0,1285875	0,1263875	0,1223625	0,11917791
60	0,1258	0,073275	0,0695875	0,06515	0,06285607
70	0,098925	0,04425	0,0389875	0,0354375	0,03295852
80	0,0827375	0,0293375	0,0226875	0,0198625	0,01709145
90	0,0732375	0,0215125	0,0145375	0,0118375	0,00908296
100	0,06785	0,0174375	0,0104625	0,008025	0,00483508

RPGM_AISL_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00559479	0,00548842	0,00669371	0,00550227	0,00604698
20	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0

RPGM_AISL_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00551251	0,00311066	0,00329949	0,00291897	0,00292354
20	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0

RPGM_AISL_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00278351	0,00287562	0,00296596	0,00339896	0,00311511
20	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0

RPGM_AISL_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00559479	0,00548842	0,00669371	0,00550227	0,00184908
20	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0

Conectividad

MG_CONECTIVIDAD_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00487534	0,00485313	0,00412016	0,0051863	0,00408685
20	0,01047254	0,01027264	0,00949525	0,01173858	0,00995058
30	0,01500361	0,01620301	0,01576989	0,01915709	0,0165806
40	0,02071187	0,02353268	0,02279971	0,02781942	0,02483203
50	0,0269643	0,0327614	0,03132878	0,0373591	0,03587095
60	0,04438892	0,05757121	0,05727136	0,06694431	0,06635571
70	0,06304625	0,07720584	0,07818313	0,08861125	0,08842246
80	0,085113	0,1002943	0,10279305	0,11175523	0,11332112
90	0,11322117	0,12642568	0,12741407	0,13615415	0,14382809
100	0,14268421	0,15457827	0,15596646	0,16681659	0,17889944

MG_CONECTIVIDAD_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00422946	0,00499487	0,00516058	0,00520266	0,00578921
20	0,0100555	0,01090244	0,01157579	0,01186512	0,01248586
30	0,01784897	0,01838028	0,01896946	0,02037402	0,02044241
40	0,02750204	0,02743102	0,02864883	0,03078724	0,03003235
50	0,0432126	0,03926458	0,04035088	0,04286015	0,04120045
60	0,10089429	0,07854231	0,07674058	0,08224835	0,07590415
70	0,15203977	0,10980825	0,10763566	0,11736763	0,10851416
80	0,21403509	0,1493569	0,14682396	0,16070649	0,14722376
90	0,29650438	0,20138878	0,19696468	0,22273863	0,19881901
100	0,37790841	0,25931508	0,25930456	0,29102028	0,26340777

MG_CONECTIVIDAD_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00496189	0,00486883	0,00522038	0,00533871	0,00485275
20	0,01082103	0,01150459	0,01209855	0,01225364	0,01106803
30	0,01720404	0,01985559	0,02115264	0,02076203	0,01919155
40	0,02541373	0,03096038	0,03222297	0,03235968	0,02991493
50	0,03518471	0,04489939	0,04641587	0,04734644	0,04437322
60	0,08113989	0,09989718	0,09831291	0,10295542	0,10029928
70	0,12710197	0,16109072	0,15439751	0,1624142	0,15628852
80	0,19495999	0,23865424	0,22945883	0,24094045	0,23285484
90	0,28826966	0,33752204	0,33057379	0,34442893	0,33684192
100	0,40927812	0,45685203	0,4569853	0,45911297	0,46457461

MG_CONECTIVIDAD_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00621548	0,004829	0,0058112	0,00557157	0,0051218
20	0,01460039	0,01132383	0,01329848	0,01302105	0,0121561
30	0,02446597	0,02138931	0,02325184	0,02304168	0,0215623
40	0,03598137	0,03486142	0,03678609	0,03679122	0,03454234
50	0,05360076	0,05438435	0,0559592	0,05577852	0,0527262
60	0,1344078	0,13691039	0,13923038	0,13937582	0,13200451
70	0,22349915	0,23717052	0,23684376	0,23537142	0,22200118
80	0,35212778	0,38408296	0,38135484	0,36615218	0,35632696
90	0,51522124	0,55124105	0,55350081	0,52092415	0,52375351
100	0,66774561	0,71293456	0,71661925	0,68294571	0,70341624

RW_CONECTIVIDAD_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00230115	0,00263333	0,00302222	0,00281111	0,00275418
20	0,00862654	0,01003333	0,01034444	0,01044444	0,01080571
30	0,02361181	0,02406667	0,0249	0,0241	0,02468766
40	0,04365516	0,04552222	0,04823333	0,04592222	0,04799822
50	0,07146907	0,07811111	0,08122222	0,07962222	0,08303626
60	0,10306264	0,11844444	0,12543333	0,12336667	0,1278805
70	0,15512201	0,175	0,18366667	0,18485556	0,18933866
80	0,23383914	0,24776667	0,26075556	0,26165556	0,26712199
90	0,30468568	0,33797778	0,35492222	0,35434444	0,36136376
100	0,37807793	0,44437778	0,46612222	0,46164444	0,47327447

RW_CONECTIVIDAD_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00267895	0,00289474	0,00306469	0,00296053	0,00295905
20	0,01101842	0,01195526	0,012214	0,01231579	0,01190194
30	0,02683947	0,03013684	0,03097601	0,03086842	0,03047161
40	0,05262632	0,06314474	0,06432953	0,06402368	0,06231095
50	0,10926053	0,11957895	0,12120271	0,12280263	0,12008732
60	0,19261316	0,21881316	0,21990732	0,21907368	0,21636024
70	0,32400789	0,35883684	0,35682052	0,35646316	0,35299193
80	0,47106316	0,50644737	0,51296964	0,51158158	0,51724927
90	0,59779474	0,65753947	0,66942945	0,67182895	0,67806097
100	0,72775	0,78397368	0,79791738	0,80218947	0,80507378

RW_CONECTIVIDAD_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00207356	0,00254138	0,0028092	0,00274138	0,00283192
20	0,00942069	0,0117	0,01215287	0,01225862	0,01241678
30	0,02386092	0,03228046	0,03331954	0,0332908	0,03428286
40	0,05859885	0,07616782	0,07881494	0,08017701	0,08233355
50	0,13014598	0,1701954	0,17491149	0,17921609	0,18037878
60	0,26156897	0,32452299	0,3436	0,35973908	0,36067598
70	0,44189425	0,53385287	0,56722644	0,5857977	0,58580939
80	0,63506552	0,73432414	0,75407356	0,76920575	0,76767134
90	0,76060805	0,85971149	0,87384253	0,88403218	0,8838776
100	0,82818391	0,92412874	0,93508276	0,94253103	0,94523658

RW_CONECTIVIDAD_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,00266795	0,00285962	0,00285321	0,0028859	0,00294789
20	0,01231154	0,01346603	0,0133641	0,01357885	0,01359256
30	0,03563654	0,04023846	0,03958782	0,0402641	0,04062072
40	0,08864744	0,10987372	0,10730256	0,10935064	0,1102122
50	0,22132308	0,28525256	0,27295705	0,27270256	0,27419367
60	0,45653205	0,54617564	0,534575	0,53343526	0,5354483
70	0,67500897	0,76340385	0,75821731	0,75746474	0,76193442
80	0,79211923	0,88115577	0,89390256	0,89175577	0,89882495
90	0,85705577	0,93559038	0,94937564	0,95239808	0,95670242
100	0,88704359	0,95862372	0,97178269	0,97557051	0,98106908

RPGM_CONECTIVIDAD_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,49744444	0,53247778	0,52840125	0,52818374	0,53202288
20	0,5212	0,54406667	0,53786462	0,53770437	0,53939697
30	0,55316667	0,56436667	0,55142507	0,54798131	0,55175745
40	0,58303333	0,57953333	0,56475173	0,56059393	0,56248542
50	0,61173333	0,5968	0,5825206	0,57624291	0,57787773
60	0,6293	0,6122	0,59958807	0,5958959	0,59723472
70	0,64843333	0,64043333	0,62834558	0,62252252	0,617991
80	0,67666667	0,66773333	0,65523269	0,64471138	0,64037981
90	0,70233333	0,6927	0,67954798	0,6692359	0,66183575
100	0,7427	0,72373333	0,7080717	0,69796463	0,68888889

RPGM_CONECTIVIDAD_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,21781684	0,23132067	0,22902895	0,23065217	0,23133696
20	0,22810841	0,24581873	0,24245263	0,2422922	0,24356506
30	0,24055539	0,26218011	0,25717895	0,2560912	0,25731345
40	0,25705178	0,28494848	0,27703421	0,27598273	0,27715353
50	0,27339078	0,30730042	0,30082632	0,29865722	0,303059
60	0,29834609	0,33352397	0,32778421	0,32408836	0,32921697
70	0,32027903	0,37134913	0,36275	0,35898739	0,36862621
80	0,34513565	0,4150278	0,40467368	0,40097417	0,40866935
90	0,36938405	0,4560525	0,44957895	0,44592559	0,45524869
100	0,40365727	0,50578763	0,49836316	0,49615597	0,50733581

RPGM_CONECTIVIDAD_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,16752414	0,17260345	0,17367356	0,17202969	0,17227593
20	0,1793046	0,18887126	0,19080115	0,189075	0,18818177
30	0,19630805	0,20840575	0,21268276	0,20990955	0,20910694
40	0,22828736	0,23495862	0,23918851	0,23637796	0,23505718
50	0,27199885	0,27426782	0,27317356	0,26905407	0,26841177
60	0,30138506	0,31880115	0,31600575	0,30782403	0,30918219
70	0,35566322	0,36605172	0,36487011	0,35310644	0,35902164
80	0,43017011	0,42801149	0,42011839	0,4049841	0,41208706
90	0,49406322	0,50048736	0,48388276	0,46321897	0,47399863
100	0,56228161	0,56555517	0,54918621	0,52437138	0,53772999

RPGM_CONECTIVIDAD_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	0,10590128	0,11302318	0,11307308	0,11325513	0,11341637
20	0,114975	0,12757853	0,12639359	0,12646282	0,12598508
30	0,12843526	0,1479432	0,14665962	0,14705	0,14563231
40	0,14848846	0,17431023	0,17573846	0,17627051	0,17444611
50	0,18014551	0,20926168	0,21629744	0,21695833	0,21471187
60	0,2156141	0,2570965	0,26951859	0,27152372	0,26699599
70	0,27789551	0,32055323	0,33254872	0,33425705	0,33084932
80	0,36225705	0,40037262	0,4134	0,41424551	0,40868028
90	0,45646731	0,48745206	0,49357179	0,49801346	0,48655736
100	0,52710641	0,56976629	0,58202628	0,58615064	0,5795647

Tiempo medio de camino sin cortes

MG_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	6,27407407	2,58687831	1,64559157	1,46378313	1,27310023
20	16,8222222	5,4866843	3,10960817	2,22510252	1,63300106
30	24,0296296	7,59527497	4,66796025	3,23807539	2,30398775
40	31,4648148	9,46325637	5,80211202	4,20720986	2,9791622
50	41,2111111	12,2855358	6,94128088	4,97254714	3,6599538
60	49,8251852	13,1803243	7,48429346	5,37272955	3,99588995
70	59,09	15,1591724	8,72568636	6,39737665	4,81454701
80	73,7333333	16,7337135	9,62269831	7,24288432	5,40733244
90	86,7485185	18,0875028	10,9472709	7,71332613	5,81680789
100	100,19843	18,8903995	11,8461701	7,99348799	6,41057367

MG_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	5,6622807	3,1291416	1,79866959	1,60137786	1,56007134
20	11,7186216	5,90092105	3,26045326	2,34226955	1,96909669
30	20,317193	8,6895888	4,67086615	3,40645748	2,73980233
40	29,5098246	10,6487029	5,93690524	4,19213546	3,39565006
50	39,1702256	12,9096788	6,8926002	4,87212221	3,85283354
60	58,030413	13,5877833	7,16024573	4,87872551	3,99479623
70	67,9330188	15,4556669	8,101401	5,44567673	4,34349041
80	67,7904594	15,359428	8,19060326	5,69808511	4,54867421
90	92,3579275	16,4327806	8,32764262	5,9672438	4,65664947
100	118,745539	18,2092117	8,76507951	6,57337156	5,06921569

MG_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	5,65103448	2,98211549	1,7947906	1,58623074	1,40018809
20	12,814751	5,81335912	3,39347322	2,33902341	1,72136627
30	20,4727203	8,36574366	4,77909894	3,27352375	2,37330638
40	30,5011932	10,3937896	5,82546521	3,93248894	2,9708111
50	37,3786864	11,6555005	6,58909513	4,47412544	3,33880909
60	42,523913	11,1232355	6,20074533	4,3639509	3,47697121
70	50,6558354	11,2520203	6,48541853	4,64866076	3,74395132
80	50,8880981	12,873967	6,77104783	5,05289715	3,98933111
90	58,9502201	13,7371622	7,67532761	5,76386383	4,22468618
100	72,4404714	16,3125643	8,67953324	6,6983694	4,96653299

MG_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	6,71006309	2,84363328	1,91471978	1,63249406	1,47911511
20	14,7087623	5,29854006	3,46932684	2,43884392	1,88335935
30	27,896047	7,79474929	4,70390207	3,38619211	2,59501419
40	35,8435429	9,67740208	5,63761245	3,92491074	3,12026796
50	44,8205459	10,6593647	6,0516519	4,34941855	3,45411457
60	49,5962409	9,19530917	5,72787568	4,12998526	3,35451814
70	45,7937469	9,64864967	5,83596066	4,35853177	3,57303375
80	51,7269948	11,2101135	6,3905463	4,94943831	3,96220402
90	78,7162205	14,6136662	8,63051508	5,91325895	4,75867519
100	101,588254	23,9439376	12,9827813	8,6078066	7,00548614

RW_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	4,27777778	2,4462963	1,59386243	1,37243386	1,17251323
20	11,3185185	5,16108466	2,66882716	1,87080091	1,46857065
30	24,0833333	7,3214377	3,86703585	2,54092643	1,98208897
40	39,0555556	9,5348845	5,00812556	3,25675436	2,59355964
50	49,0633333	11,6148223	6,08841189	3,98153601	3,19674555
60	58,2404762	13,2917877	6,84725033	4,69274716	3,70338544
70	52,4188536	13,7342276	7,44297947	5,09439422	4,21781523
80	85,7562875	16,7109885	8,6887986	6,17885286	4,86915847
90	89,9693996	18,3705533	9,57911018	7,04692308	5,65786969
100	109,351884	22,0364187	11,7524111	8,20382234	6,62601552

RW_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	4,64912281	2,33184211	1,52064745	1,2976069	1,16290727
20	15,645614	4,93658104	2,63078757	1,89943803	1,49860819
30	27,5616667	6,81925109	3,66080476	2,64270217	2,10524244
40	32,5312907	7,85962784	4,3814224	3,20241793	2,56306945
50	39,4796548	9,15476168	5,07113519	3,60798828	2,97562035
60	50,1118784	10,5257631	5,92982751	4,25577303	3,45514414
70	58,1804378	13,7230398	7,23591451	5,31164598	4,26947224
80	99,0289613	18,5140459	9,27385795	6,71270988	5,49151416
90	132,776592	26,6061907	13,16433	9,54680531	7,63399946
100	228,963651	40,1501907	22,637206	16,0287662	13,0605059

RW_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	3,50689655	2,16912151	1,46279868	1,23071113	1,15400126
20	12,9290421	4,67607489	2,58267117	1,83178153	1,49403448
30	23,0676382	6,23582105	3,42307789	2,50609534	2,03622784
40	28,625081	6,75551426	3,91474171	2,91454352	2,4793358
50	33,6446406	8,03333686	4,4128666	3,28168142	2,86171094
60	39,8078761	9,94422701	5,65351217	4,2135539	3,55283472
70	54,4965205	14,0292152	8,42995067	6,43507845	5,34572094
80	102,156581	25,9707015	15,2171139	12,3595873	9,60944174
90	203,835654	55,1340416	31,6218225	25,2291768	18,7883495
100	408,092143	108,564371	66,2774646	52,2640916	40,7878393

RW_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	4,42264957	2,39884615	1,4867267	1,27497863	1,17670678
20	14,9232448	4,7750177	2,60811572	1,89005868	1,55591215
30	25,6365958	5,82445513	3,37957491	2,55304643	2,10895154
40	30,3422822	6,31891399	3,71756541	2,95476634	2,47850688
50	30,672358	7,52414979	4,4174609	3,40924221	2,98428863
60	46,1388491	12,8473057	7,08548712	5,28386346	4,46253358
70	118,68608	26,1730269	13,2015501	9,81129997	8,21664852
80	202,845595	63,6852109	32,967718	22,993382	19,5719435
90	497,680282	146,859607	86,9441523	58,0071222	47,885006
100	815,678683	283,318482	187,232825	134,649148	111,314788

RPGM_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	923,485185	817,828642	581,124809	387,858047	390,65933
20	1004,95	1069,46667	1059,28611	1057,9641	1068,21111
30	1020,93333	1073,60833	1060,58291	1058,72593	1068,61795
40	1035,86667	1075,06667	1061,36209	1059,13867	1068,96768
50	1050,21667	1076,38889	1062,03838	1059,56042	1069,42833
60	1059	1077,06667	1061,89556	1059,86829	1069,75733
70	1068,56667	1077,05614	1062,87111	1060,5	1070,12069
80	1082,68333	1079,22	1063,83918	1061,13987	1070,65484
90	1095,51667	1082,55789	1065,79111	1061,89308	1071,03781
100	1091,05333	1084,82	1066,86787	1063,09872	1071,64667

RPGM_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	338,242105	273,735762	162,364356	125,680786	133,011767
20	434,191228	455,379856	452,234754	453,212201	454,369765
30	443,84386	457,601188	453,358063	453,832445	454,788724
40	461,089474	459,930727	454,278903	454,421851	455,292006
50	472,483333	462,732473	455,374593	455,216203	455,910963
60	482,47193	464,018667	456,107475	455,829343	456,37612
70	513,089474	465,842834	456,815616	456,485283	456,796891
80	502,964035	467,336146	457,89565	457,040699	457,3547
90	506,735789	469,656063	459,296995	457,881754	457,933514
100	519,532632	473,400312	460,884482	459,126979	458,979419

RPGM_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	263,437241	221,619727	213,209085	174,339572	171,400998
20	340,304598	330,24075	329,026845	326,57214	328,324531
30	353,641034	332,263463	330,299207	327,292141	328,938634
40	375,364521	334,330895	331,321781	328,149608	329,580298
50	389,221264	337,360315	332,335833	328,863464	330,050092
60	395,676437	339,918769	333,542272	329,663076	330,563997
70	390,832074	342,012181	334,714693	330,396348	331,098579
80	415,168476	343,827764	335,677173	331,222454	331,954079
90	435,934451	346,809844	336,878773	331,877796	332,539858
100	463,370626	352,813747	338,900453	333,009219	333,646723

RPGM_TIEMPO_MEDIO_ENLACE_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	181,036004	107,682007	80,6674013	71,8480972	76,3911176
20	219,954701	217,0194	214,671373	214,463693	214,666043
30	231,997009	219,208184	215,566046	215,084075	215,083963
40	238,441346	220,474016	216,511654	215,732687	215,628028
50	254,08326	221,877741	217,256251	216,273283	216,035462
60	263,473782	224,143693	218,566916	217,018426	216,68549
70	264,055472	225,155959	219,303442	217,619172	217,304088
80	272,558287	226,896898	220,441158	218,379513	217,862945
90	300,169268	231,092778	222,250705	219,75728	218,731374
100	309,513473	234,283427	223,893372	221,122895	219,864995

Tiempo medio de corte de un camino

MG_TIEMPO_MEDIO_CORTE_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1452,71111	647,052222	436,251675	324,888663	315,214862
20	1422,84444	524,785397	352,684217	201,370182	163,599029
30	1372,67037	457,065106	308,565747	174,702199	138,58224
40	1346,32778	402,070313	264,357796	155,985877	117,181185
50	1340,61481	361,667729	227,350938	138,243623	98,2957053
60	1083,44444	219,786927	125,473861	76,0556047	56,2187867
70	1020,02444	188,901688	103,830605	66,6788147	49,6000272
80	920,41963	159,492942	85,0421881	57,900139	42,6465536
90	847,473757	132,143655	76,8334037	49,0733882	34,8576787
100	591,543413	105,758887	65,3756533	39,9425778	29,4879832

MG_TIEMPO_MEDIO_CORTE_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1498,45955	742,101236	384,494506	324,713309	286,43742
20	1422,65178	668,935449	302,991665	206,229388	163,226008
30	1333,61779	559,123161	259,610327	171,075053	134,633178
40	1207,41026	442,449576	209,469967	135,278687	111,678664
50	1034,89572	363,202542	170,824237	112,050195	91,1792991
60	633,675944	170,786246	87,5309054	55,6494813	48,7925537
70	472,565879	130,791063	67,9614868	41,7100918	35,8075887
80	321,729092	89,5417517	47,8780691	30,1445791	26,3758772
90	241,168743	66,1332158	34,0958458	21,0098959	18,7659235
100	183,692328	52,4848267	25,0572248	16,0617175	14,1556579

MG_TIEMPO_MEDIO_CORTE_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1596,48758	654,856114	379,761278	317,311869	303,002286
20	1532,09421	569,865447	298,37382	195,567487	159,946785
30	1456,06145	468,106215	238,874489	160,888005	125,072723
40	1367,22744	370,695322	185,575509	120,987568	98,4466798
50	1248,84042	283,193534	142,02048	92,3646622	73,085948
60	760,252972	106,700615	58,3956667	38,6544532	31,4845849
70	547,374217	60,9821322	35,9545884	24,2621723	20,4715229
80	263,274944	41,7459317	22,910275	16,0211872	13,2408997
90	157,885964	27,2919774	15,5951886	10,9560407	8,33565388
100	96,3369484	19,2829273	10,3028293	7,86603633	5,72822332

MG_TIEMPO_MEDIO_CORTE_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1480,71067	688,850504	356,002077	306,821322	305,538682
20	1389,77543	568,46314	282,620312	193,720977	157,96155
30	1289,08105	421,5518	211,117261	150,697935	122,166107
40	1157,76028	315,53229	156,280898	107,425132	89,5074382
50	975,631626	210,176043	106,114693	76,1000704	63,4289332
60	372,760401	61,222955	36,2168157	25,8231396	22,3701532
70	170,868232	31,6815165	19,014469	14,2264639	12,5958173
80	94,6728729	17,884538	10,3576298	8,55308706	7,16186418
90	68,7141266	11,7222877	6,89844066	5,40981417	4,30938707
100	45,9935763	9,37524622	5,05480368	3,96122097	2,93992828

RW_TIEMPO_MEDIO_CORTE_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1589,6037	801,821534	479,176411	449,414372	411,924004
20	1381,66852	450,627972	245,845283	171,818759	132,777474
30	1024,31407	288,044489	150,207682	102,434735	79,2606171
40	729,06037	196,28069	96,5027603	67,0599089	51,4554549
50	549,252222	137,208041	67,9976669	45,7278006	35,2476608
60	461,085159	97,7971099	47,5964622	33,2896844	25,2244984
70	271,095538	64,1450425	33,0962911	22,4743082	18,0453454
80	254,195106	50,0460947	24,6112396	17,4464756	13,3450665
90	187,746688	35,2276128	17,2713083	12,7927519	9,9983149
100	160,016386	26,8777438	13,3160273	9,49898568	7,36692001

RW_TIEMPO_MEDIO_CORTE_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1649,31579	781,780201	483,257567	423,516585	402,963299
20	1323,48518	419,979011	214,991643	153,854384	126,283381
30	961,422782	223,122718	114,142079	83,3770917	67,3090005
40	572,286974	116,561988	63,5399252	47,0070093	38,7967846
50	326,087806	67,1208323	36,7468106	25,7661513	21,8508097
60	197,302658	37,5312934	20,8916424	15,1238279	12,5147323
70	113,085875	24,3572964	12,9618715	9,55736316	7,81611899
80	99,4715605	17,8347115	8,73712536	6,37034707	5,1052859
90	81,5765528	13,5658485	6,43950163	4,62867655	3,60888463
100	77,327729	10,7486787	5,65343653	3,90951853	3,13677987

RW_TIEMPO_MEDIO_CORTE_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1667,83946	853,290965	516,914722	448,723438	398,521576
20	1323,17356	389,066988	211,785888	1,83333333	119,003804
30	956,271967	192,772127	99,634062	72,9875235	57,3880405
40	494,832149	82,5380924	45,7454994	33,3867773	27,589814
50	221,107953	38,9714187	20,7672022	14,9953268	12,979028
60	107,443978	20,511934	10,7311985	7,46648831	6,28569035
70	64,7343754	12,0556043	6,38329999	4,52456652	3,77809423
80	54,1134856	9,17442083	4,90273266	3,67394281	2,90483005
90	59,455092	8,69291848	4,49425228	3,26580129	2,47009498
100	80,0122177	8,63348234	4,50391334	3,12179998	2,37456759

RW_TIEMPO_MEDIO_CORTE_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	1634,05731	819,872421	504,347594	449,959805	403,060405
20	1233,88521	351,142129	191,114965	136,621422	113,078542
30	739,918183	141,560518	82,4577466	60,8306221	49,8487403
40	327,415342	51,8614403	31,0357374	24,0851762	20,0610429
50	107,409398	18,8635789	11,7705679	9,08867327	7,91126785
60	54,3628028	10,6137745	6,14930351	4,61442492	3,87883729
70	53,6350523	7,94312306	4,17938348	3,12303784	2,56403515
80	48,7923793	8,34039481	3,85990596	2,76035385	2,18754009
90	77,2362831	9,62466087	4,51125872	2,83037674	2,14540377
100	103,167471	11,7911865	5,03739977	3,21927502	2,11239217

RPGM_TIEMPO_MEDIO_CORTE_10Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	102	283	599	593	597
20	9	2	1	0	0
30	22	7	2	1	0
40	43	8	3	2	1
50	56	9	4	2	1
60	65	10	4	3	2
70	75	10	5	3	2
80	89	12	6	4	3
90	102	15	7	5	3
100	97	18	9	6	4

RPGM_TIEMPO_MEDIO_CORTE_20Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	122	67	159	165	168
20	7	4	2	1	0
30	13	5	2	2	1
40	24	8	3	2	1
50	31	11	5	3	2
60	41	12	5	3	3
70	58	14	6	4	3
80	59	16	7	5	4
90	67	18	8	6	4
100	78	21	10	7	5

RPGM_TIEMPO_MEDIO_CORTE_30Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	75	73	56	74	66
20	11	4	2	1	1
30	20	7	4	2	1
40	35	8	4	3	2
50	52	12	5	4	2
60	60	14	7	4	3
70	60	16	8	5	4
80	80	18	9	6	4
90	101	21	10	6	5
100	123	27	12	8	6

RPGM_TIEMPO_MEDIO_CORTE_40Nodos

	1m/s	5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	21	95	81	65	55
20	17	5	2	1	1
30	18	7	3	2	1
40	27	9	4	2	2
50	39	10	5	3	2
60	51	12	6	4	3
70	54	13	7	4	3
80	68	15	8	5	4
90	97	20	10	7	5
100	117	23	12	8	6